

**République Algérienne Populaire et Démocratique**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Structure**

**Thème :**



***Etude de la résistance des mortiers***  
***Aux attaques acides***

**Présenté par :**

**HAFFAF Ikram**

**LAMOURI Oum El Kheir**

**Soutenu le 04 juillet** devant le jury composé de :

**Dr. SAIL Latifa.**

**Présidente**

**Pr. BENOSMAN Ahmed Soufiane. (ESSAT)**

**Examineur**

**Pr. BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine.**

**Encadreur**

**Dr. TALEB Omar.**

**Co-encadreur**

**Dr. YOUSARI fatima zohra**

**Co-encadrante**

**Année universitaire : 2018-2019**

# *Remerciements*

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.

Nous tenons dans un premier temps à adresser nos vifs remerciements accompagnés par des sentiments les plus dévoués à nos encadreurs **Pr. BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine, Dr. TALEB Omar** et **Melle YOUSARI Fatima Zohra** pour leurs soutiens, leurs disponibilités et leurs précieux conseils tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier également **Dr. SAIL Latifa** de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à **Pr. BENOSMAN Ahmed Soufiane** (ESSAT) pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner.

Nous adressons nos remerciements et notre sympathie à nos chers enseignants du département de génie civil pour toutes les connaissances acquises au cours de notre formation.

Nous rendons un grand hommage à l'ensemble du personnel du Laboratoire Eau et Ouvrage Dans Leur Enivremments « EOLE » pour leurs aides et assistance en vue de notre réussite.

Notre gratitude la plus profonde à tous nos amis de la promotion ainsi qu'à tous le personnel du département de génie civil de l'université de Tlemcen.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma chère maman pour sa énorme sacrifice pour ma réussite dans mon parcours scolaire, ses grands efforts et surtout sa patience à qui je souhaite une longue vie.*

*A l'âme de mon très cher père que j'ai souhaité l'avoir avec moi dans ma réussite. Allah yerahmek*

*A mon cher frère **Habib***

*A mon binôme et sœur **LAMOURI Oum El Kheir** qui à partager avec moi les travaux de ce projet et sa respectueuse famille.*

*A mes amis : **R. Batoul Rayane, K. Hanane, Y. Fatima zohra, K. Asma, T.khadija, Z. Monia , S.Wassila, W. Imen, O. samira, B. Asma, G. Chahinez, A. Fatena et R. Ilyes***

*Ainsi qu'à l'ensemble de mes condisciples (promotion 2018/2019).*

*Enfin pour tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié personne dans cette courte page.*

***HAFFAF Ikram***



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*A mes très chères parents qui m'ont soutenue moralement et financièrement et de tendresse qu'Allah me les garde durant toute ma vie.*

*Ma mère qui a toujours cru en moi et mes études.*

*Mon père qui m'a toujours encouragé et guidé.*

*Ma grande mère.*

*A mes frères: **Nour Eddine, Abderahim, Yasser et Mouad** .*

*A ma sœur et ma binôme **HAFFAF Ikram** qui n'a pas cessé et m'encourager tout le temps et sa respectueuse famille.*

*A mes amies intimes : **H .Ilham, CH.Fatima , S.Hadjer** .*

*A toute les familles : **Lamouri, Sayah** grands(es) et petits(es).*

*A mes amis de l'université : **T.khadija, Y.Fatima zohra K.Asma, K.Hannane, Z.Moniam, Y.Fatima, S.Wassila, W.Imen, B.Chamia, M.Souhila, B.Asma ,A.Fatena, S.Hind, S.Emna et A.Yassin** .*

*A tout ma promotion de Génie Civil 2018 /2019*

*A Tous ceux qui me connaissent*

***LAMOURI Oum El Kheir***



# Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction Générale

<b>Chapitre I. GENERALITES SUR LES CIMENTS.....</b>	<b>1</b>
I.1. Historique.....	2
I.2. Définition.....	3
I.3. Les constituants des ciments.....	4
I.3.1. Le clinker.....	4
I.3.1.1. Composition chimique du clinker.....	5
I.3.1.2. Composition minéralogique du clinker.....	5
I.3.2. Le gypse.....	6
I.3.3. Additions minérales.....	7
I.4. Matières premières.....	7
I.4.1. Calcaire.....	8
I.4.1.1. Les impuretés.....	8
I.4.2. Eléments argileux calcaires.....	9
I.4.3. Agrile.....	10
I.4.4. Matières auxiliaires.....	11
I.4.4.1. Les matériaux correctif.....	11
I.4.4.2. Les minéralisateurs.....	12
I.5. Ajouts cimentaires.....	12
I.5.1. Définition des ajouts cimentaires.....	12
I.5.2. Classification des ajouts.....	13
I.5.3. Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaires.....	13
I.5.3.1. Bénéfices écologiques et environnementaux.....	13
I.5.3.2. Bénéfices fonctionnels.....	13
I.5.3.3. Bénéfices économiques.....	14
I.5.4. Les différents types d'ajouts aux ciments.....	14
I.5.4.1. Les cendres volantes(V).....	14
I.5.4.2. La pouzzolane.....	14
I.5.4.3. Effet de La pouzzolane.....	17
I.5.4.4. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes.....	17
I.5.4.5. Hydratation et réaction pouzzolanique.....	18
I.5.4.6. Différentes utilisations de la pouzzolane.....	19
I.6. Processus de fabrication du ciment.....	20
I.6.1. Extraction.....	21
I.6.2. Concassage.....	22
I.6.3. Le séchage et le broyage.....	23

I.6.4. Homogénéisation.....	24
I.6.5. La cuisson.....	24
I.6.6. Broyage du clinker.....	25
I.6.7. Stockage, ensachage et expédition.....	25
I.6.8. Les transporteurs.....	25
I.6.9. Procédés de fabrication du ciment portland.....	26
I.6.9.1. Procédés en voie sèche et semi-sèche.....	26
I.6.9.2. En voie humide ou semi-humide.....	26
I.7. Hydratation du ciment.....	26
I.7.1. Hydratation et prise du ciment Portland (CPA).....	26
I.7.2. Hydratation du Silicate tricalcique C <sub>3</sub> S.....	27
I.7.3. Hydratation du silicate bicalcique C <sub>2</sub> S.....	28
I.7.4. Hydratation de l'aluminate tricalcique C <sub>3</sub> A.....	28
I.7.5. Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique C <sub>4</sub> AF.....	29
I.8. Classification des ciments.....	29
I.8.1. Classification des ciments en fonction de leur composition.....	30
I.8.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale.....	30
I.8.3. Propriétés des ciments.....	31
I.8.4. Les différents types des ciments spéciaux.....	32
I.9. les ajouts minéraux.....	32
I.9.1. Les fonctions des fillers.....	34
I.9.2. Les fillers calcaires.....	34
I.9.3. La poudre de brique.....	35
I.10. Conclusion.....	36
<b>Chapitre II. IDENTIFICATION DES MORTIERS.....</b>	<b>37</b>
II.1. Définition.....	38
II.2. Constituants des mortiers.....	39
II.2.1. Le Liant.....	39
II.2.2. Le sable.....	39
II.2.3. L'eau de gâchage.....	40
II.3. Le rôle d'utilisation du mortier.....	40
II.4. Classification des mortiers.....	41
II.4.1. Classification générale des mortiers.....	41
II.5. Classes des mortiers.....	43
II.6. Préparation des mortiers.....	43
II.7. Caractéristiques des mortiers.....	44
II.7.1. Prise.....	44
II.7.2. Résistances mécaniques.....	45
II.7.3. Retraits et gonflements.....	45
II.8. Définition des caractéristiques des additions.....	46
II.9. Les essais mécaniques sur le mortier.....	46
II.9.1. Essai de compression par flexion.....	47
II.10. Les attaques chimiques des bétons.....	50
II.10.1. Actions des acides.....	50



II.10.2. Mécanisme d'attaque.....	51
II.11. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des mortiers aux attaques acides.....	52
<b>Chapitre III. IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET MORTIERS.....</b>	<b>53</b>
III.1. Introduction.....	54
III.2. Caractéristiques des Matériaux.....	54
III.2.1. Sable.....	54
III.2.1.1. La Masse Volumique.....	54
III.2.1.2. L'absorption de l'eau par le sable .....	57
III.2.1.3. L'analyse granulométrique par tamisage du sable.....	57
III.2.1.4. Equivalant du sable.....	60
III.2.1.5. Foisonnement du sable et teneur en eau.....	63
III.2.2. Ciment et les ajouts.....	65
III.2.2.1. Les Masses Volumiques ( Absolues et Apparentes).....	66
III.2.2.2. Détermination de la consistance normalisée et du temps de prise .....	66
III.2.2.3. La surface spécifique de Blaine SSB NF P 15-471.....	70
III.2.3. Retrait des mortiers.....	74
III.2.4. Eau de Gâchage.....	76
III.3. Conclusion.....	76
<b>Chapitre IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>77</b>
IV.1. Introduction.....	78
IV.2. Formulation des mortiers.....	78
IV.3. Composition des mortiers.....	79
IV.4. Préparation des solutions.....	79
IV.5. Procédure expérimentale.....	80
IV.6. Résultats et discussions.....	81
IV.6.1. Perte de masse.....	81
IV.6.1.1. Perte de masse en solution acide (HCL).....	81
IV.6.1.2. Perte de masse en solution basique (Ca(OH) <sub>2</sub> ).....	82
IV.6.1.3. Interprétation des résultats.....	83
IV.6.2. Résistances Mécaniques.....	86
IV.6.2.1. Interprétation des résultats.....	87
IV.7. Conclusion.....	90
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>91</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>92</b>



# Liste des Figures

## Figures du chapitre I. GENERALITES SUR LES CIMENTS

<b>Figure I.1</b> :Les constituants du ciment.....	4
<b>Figure I.2</b> : Le clinker .....	4
<b>Figure I.3</b> : Roche de gypse.....	6
<b>Figure I.4</b> : Roche de calcaire.....	8
<b>Figure I.5</b> : L'argile.....	10
<b>Figure I.6</b> : La pouzzolane .....	15
<b>Figure I.7</b> : Les différents types de pouzzolane.....	15
<b>Figure I.8</b> : Processus de fabrication du ciment.....	20
<b>Figure I.9</b> : La fabrication du ciment-les étapes principales du processus par voie sèche..	21
<b>Figure I.10</b> : Extraction.....	21
<b>Figure I.11</b> : Concassage des matières premières au niveau de la carrière.....	23
<b>Figure I.12</b> : Broyeur.....	23
<b>Figure I.13</b> : Le four rotatif.....	24
<b>Figure I.14</b> : Silos de stockage du ciment.....	25
<b>Figure I.15</b> : Silicate tricalcique $C_3S$ .....	27
<b>Figure I.16</b> : Silicate bi calcique $C_2S$ .....	28
<b>Figure I.17</b> : La microscopie de l'aluminate tricalcique $C_3A$ .....	28
<b>Figure I.18</b> : Etude physicochimique du ciment.....	29
<b>Figure I.19</b> : Fillers calcaires.....	34
<b>Figure I.20</b> : Poudre de Brique.....	35

## Figures du chapitre II. IDENTIFICATION DES MORTIERS

<b>Figure II.1</b> : L'obtention et constituants des mortiers.....	38
<b>Figure II.2</b> : Les moules des mortiers.....	47
<b>Figure II.3</b> : Malaxeur.....	48
<b>Figure II.4</b> : Table vibrante.....	48
<b>Figure II.5</b> : L'appareil de compression.....	49
<b>Figure II.6</b> : L'appareil de flexion, figure (a) et (b) .....	50

## Figures du chapitre III. IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET MORTIERS

<b>Figure III.1</b> : Essai de la masse volumique apparente.....	54
<b>Figure III.2</b> : Essai de la masse volumique absolue à la méthode de l'éprouvette graduée	55
<b>Figure III.3</b> : Essai de la masse volumique absolue du sable par la méthode du ballon....	56
<b>Figure III.4</b> : Essai d'absorption d'eau par le sable .....	57
<b>Figure III.5</b> : Essai d'analyse granulométrique du sable.....	58
<b>Figure III.6</b> : Courbe granulométrique du sable.....	59

<b>Figure III.7</b> : Matériel utilisé.....	60
<b>Figure III.8</b> : ESV (Equivalent du sable visuel).....	61
<b>Figure III.9</b> : ESP (Equivalent du sable piston).....	61
<b>Figure III.10</b> : Essai d'équivalent du sable.....	62
<b>Figure III.11</b> : Essai de foisonnement.....	63
<b>Figure III.12</b> : Courbe de foisonnement du sable et teneur en eau.....	64
<b>Figure III.13</b> : L'essai de consistance.....	66
<b>Figure III.14</b> : Évolution de l'enfoncement de la sonde en fonction du dosage.....	67
<b>Figure III.15</b> : L'essai de début et fin de prise.....	69
<b>Figure III.16</b> : Perméabilimètre de Blaine.....	70
<b>Figure III.17</b> : La surface spécifique de Blaine.....	73
<b>Figure III.18</b> : Moule pour essai de fissuration pour mortier.....	74
<b>Figure III.19</b> : La variation de la fissuration en fonction du temps.....	76

#### **Figures du chapitre IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

<b>Figure IV.1</b> : Organigramme résumant le travail expérimental.....	81
<b>Figure IV.2</b> : Variation de la perte en poids des mortiers à base de fillers calcaires en fonction de la période d'immersion en 5%HCl et 5%Ca(OH) <sub>2</sub> .....	84
<b>Figure IV.3</b> : Variation de la perte en poids des mortiers à base de poudre de brique en fonction de la période d'immersion dans 5% de HCl et Ca(OH) <sub>2</sub> .....	85
<b>Figure IV.4</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant les filières calcaires immergés en HCl et Ca(OH) <sub>2</sub> .....	87
<b>Figure IV.5</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant la poudre de brique immergés en HCl et Ca(OH) <sub>2</sub> .....	88
<b>Figure VI.6</b> : Comparaison des résistances mécaniques à la compression des différents mortiers immergés dans HCl.....	89
<b>Figure VI.7</b> : comparaison des résistances mécaniques à la compression des différents Mortiers immergés dans Ca(OH) <sub>2</sub> .....	90

# Liste des Tableaux

## Tableaux du chapitre I. GENERALITES SUR LES CIMENTS

Tableau I.1: Composition chimique du gypse.....	7
Tableau I.2 : Classification des ajouts selon leur réactivité [15].....	13
Tableau I.3 : Classification du ciment en fonction de sa résistance.....	30
Tableau I.4 : Caractéristiques du ciment [30].....	31
Tableau I.5 : Composition minéralogique des déchets de briques.....	36

## Tableaux du chapitre II. IDENTIFICATION DES MORTIERS

Tableau II.1: Dosages des mortiers.....	43
---	----

## Tableaux du chapitre III. IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET MORTIERS

Tableau III.1 : Essai de la masse volumique apparente du sable.....	55
Tableau III.2 : Masse volumique absolue du sable par la méthode de l'éprouvette graduée.....	56
Tableau III.3 : Masse volumique absolue du sable par la méthode du ballon.....	56
Tableau III.4: Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	58
Tableau III.5: Classement du sable.....	59
Tableau III.6 : L'essai de l'équivalent du sable.....	62
Tableau III.7 : L'essai de foisonnement du sable et teneur en eau.....	64
Tableau III.8 : Résumé des résultats des essais sur le sable.....	65
Tableau III.9 : Composition chimique du ciment (en %)......	65
Tableau III.10: La hauteur de l'enfoncement.....	67
Tableau III.11 : Résultats d'essai de consistance normalisée.....	68
Tableau III.12 :Début et fin de prise.....	70
Tableau III.13 : Les caractéristiques du ciment et des ajouts.....	73
Tableau III.14 : Les résultats d'essai 1, E/C=0.5.....	74
Tableau III.15 : Les résultats d'essai 2, E/C=0.5.....	75
Tableau III.16 : Les résultats d'essai 1, E/C=0.7.....	75

## Tableaux du chapitre IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau IV.1 : Les différentes compositions des mortiers.....	79
Tableau IV.2 : Perte de masse des mortiers immergés dans HCl.....	82
Tableau IV.3 : Perte de masse des mortiers immergés dans Ca(OH) <sub>2</sub> .....	83
Tableau IV.4 : Les résistances des mortiers contenant les fillers calcaires immergés dans HCL et Ca(OH) <sub>2</sub> .....	86
Tableau IV.5 : Les résistances des mortiers contenant de la poudre de brique dans HCl et Ca(OH) <sub>2</sub> .....	86
Tableau IV.6 : Les résistances des mortiers immergés dans HCl.....	88
Tableau IV.7 : Les résistances des mortiers immergés dans Ca(OH) <sub>2</sub> .....	89

# Résumé

Ce travail consiste à une étude du comportement des mortiers avec des additions minérales (fillers calcaires et poudre de brique) en faisant varier le pourcentage des substitutions de 5%, 10% et 15%. Ces mortiers sont soumis à des attaques chimiques dans deux milieux agressifs.

Nous avons utilisé pour ce travail des mortiers prismatiques du 160x40x40 mm<sup>3</sup>. Après 24 heures et après démoulage des éprouvettes, elles sont immergées dans deux solutions acide (HCl) et basique (Ca(OH)<sub>2</sub>) de même concentration 5% pendant une durée de 28 jours. Des essais de mesure de poids pour la perte de masse et de résistance à la compression sont effectués à différents âges sur les éprouvettes et ceci pour les deux milieux agressifs.

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique des ajouts des fillers calcaires et de poudre de brique sur la durabilité aux attaques acides.

**Mots clés :** Mortier, Milieux agressifs, Fillers calcaires, Poudre de brique, Durabilité, Acide, Basique, Attaque acide.

# Abstract

This work consists of a study of the behavior of mortars with mineral additions (calcareous fillers and brick powder) by varying the percentage of substitutions by 5%, 10% and 15%. These mortars are subjected to chemical attack in two environments aggressive.

For this work we used 160x40x40 mm<sup>3</sup> prismatic mortars. After 24 hours and after demolding the test pieces, they are immersed in two solutions acid (HCl) and basic (Ca (OH)<sub>2</sub>) of the same concentration 5% for a period of 28 days. Weight measurement tests for mass loss and compressive strength are performed at different ages on the specimens and this for both aggressive media.

The results obtained make it possible to highlight the beneficial effect of additions of calcareous fillers and brick powder on the durability acid attacks.

**Key words:** Mortar, Aggressive media, Limestone fillers, Brick powder, Durability, Acid, Basic, Acid attacks.

## ملخص

يتكون هذا العمل من دراسة سلوك الملاط مع الإضافات المعدنية (مسحوق الحجر الجيري ومسحوق الأجروري) عن طريق تغيير نسبة البدائل بنسبة 5 % و 10 % و 15 % ، وهذا الملاط يتعرض لهجوم كيميائي في بيئتين عدوانية.

استخدمنا لهذا العمل قوالب المنشورية ذات مقاسات  $160 \times 40 \times 40$  ملم<sup>3</sup> . وبعد 24 ساعة يتم إزالة قطع الاختبار ، بعد ذلك غمرها في محلول حامض (حمض الهيدروكلوريك) (HCl) والحلول الأساسية (Ca (OH)<sub>2</sub>) بنفس التركيز 5% لمدة 28 يومًا. يتم إجراء اختبارات قياس الوزن لفقدان الكتلة وقوة الضغط في مختلف الأعمار على العينات وهذا لكل من الوسائط العدوانية.

تتيح النتائج التي تم الحصول عليها تسليط الضوء على التأثير الإضافات من المواد مسحوق الحجر الجيري ومسحوق الأجروري على متانة الهجمات الحمضية في بيئتين عدوانية.

**الكلمات المفتاحية:** الملاط ، الوسائط العدوانية ، مسحوق الحجر الجيري ، مسحوق الأجروري ، المتانة ، الحمض ، الأساسية ، الهجمات الحمضية.



# Introduction Générale

Le ciment est le constituant de base des bétons et des mortiers. Ce liant hydraulique permet en effet de coller entre eux les grains de sable et les granulats. Mis au point au début du XIXe siècle, le ciment est aujourd'hui le deuxième produit de consommation courante dans le monde après l'eau, et ne cesse d'augmenter.

Ce travail a pour objectif d'une part, d'établir un programme expérimental visant à étudier l'utilisation des additions tel que les fillers calcaires et la poudre de brique comme substituants du ciment et ceci sur des mortiers 40x40x160 mm<sup>3</sup> et d'autre part, d'étudier l'influence de l'emploi de ces additions sur les attaques chimiques des mortiers, pour cela, deux solutions ont été envisagés, il s'agit, de l'acide chlorhydrique HCL et la chaux Ca(OH)<sub>2</sub> à la concentration 5%.

Ce travail s'organise en quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne un état de l'art sur les ciments, tout en évoquant leurs compositions, fabrications, classes et types.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques des mortiers, pour cela nous nous sommes intéressés aux différents mortiers, leurs compositions, leurs fabrications, ainsi que l'influence des milieux agressifs sur ces mortiers.

Le troisième chapitre regroupe les résultats des essais de caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés.

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats obtenus ainsi que les interprétations correspondantes.

Ce travail sera achevé par une conclusion générale et des perspectives éventuelles.

# Chapitre I.

---

## GENERALITES SUR LES CIMENTS

---

## I.1 . Historique

Il y a plus de 20<sup>e</sup> siècles, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la chaux  $\text{Ca(OH)}_2$  et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice.

L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle par exemple le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation et les secrets de fabrication de ce matériau se sont ensuite perdus à la chute de l'empire face au retour de la maçonnerie en pierre [1].

Matériau centenaire. L'écossais Aspdin prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.

Ainsi, le XX<sup>e</sup> siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux. C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants [2].

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire à produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé à quarante heures en 1870 [3].

## I.2 . Définition

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine mélangée avec l'eau, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger les granulats (sable fin et gravier ) pour donner les bétons et les mortiers [4].

Une Pâte = Ciment + Eau.

Un mortier = Ciment + Eau + Sable.

Un Béton = Ciment + Eau + Sable + Graviers.

En Algérie, la production du ciment est une industrie de base. L'état a consenti de très importants investissements pour le développement de la filière. Cependant, en raison de la forte demande accentuée par le programme de la relance économique (les grands ouvrages, un million de logements, autoroutes et d'autres équipements publics), l'offre reste insuffisante, et pour remédier à cela les autorités ont décidé d'investir pour augmenter la capacité de production qui était de 11,6 millions de tonnes pour la porter à 17,6 millions de tonnes en 2012 [5].

La production du ciment en Algérie, qui oscille actuellement entre 25 et 30 millions de tonnes, atteindra les 40 millions de tonnes an en 2020.

### I.3 . Les constituants des ciments

cet figure représente ensemble de constituants et les étapes de fabrication de ciment.



**Figure I.1** : Les constituants du ciment.

#### I.3.1 . Le clinker

Constituant du ciment obtenu par calcination d'un mélange d'oxyde silicique, d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux, cela sert à fabriquer le ciment, entrant lui-même dans la liste des constituants des bétons et des mortiers [6].



**Figure I.2** : Le clinker.

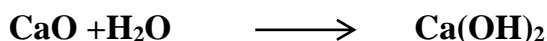
### I.3.1.1. Composition chimique du clinker

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.

Le clinker portland comprend les oxydes suivants :

CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO<sub>2</sub>.

• **CaO** : Il est lié avec SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, à l'état libre il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation.



La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif [7].

### I.3.1.2. Composition minéralogique du clinker

- **Silicate tricalcique : Alite « C<sub>3</sub>S » : 40 à 65%.**

C'est l'élément actif du ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement. Au microscope, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions, à couleur bien marquée [7].

Formulé 3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S, c'est le principal constituant du clinker, qui lui confère ses propriétés hydrauliques.

- **Silicate bicalcique : Bélite « C<sub>2</sub>S » : 8 à 35%.**

Formulé 2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S, il confère au ciment des résistances moins élevées que le «C<sub>3</sub>S» ,mais développe les résistances à long terme. Au microscope, il apparaît sous forme de grains arrondis [7].

- **Aluminate tricalcique : Cérite : « C<sub>3</sub>A » : 1 à 13%.**

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière, est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il est facilement attaqué par les sulfates. Il forme avec les sulfo-aluminates de chaux, les sels de Candlot, souvent très expansifs. La réaction d'hydratation

est fortement exothermique (en dégageant une grande quantité de chaleur), elle contribue essentiellement à la prise de la pâte du ciment [7].

➤ **Aluminate tétra calcique : Féelite : « C<sub>4</sub>AF »:3 à14%.**

Il est appelé aussi la féelite. Forme la solution solide C<sub>2</sub>A et C<sub>2</sub>F. Il confère au ciment des résistances faibles et peu précises. On peut dire qu'il est inactif sur le plan hydraulique, et il constitue un fondant pendant la cuisson avec « C<sub>3</sub>A » [7].

En plus de ces quatre phases le clinker peut contenir également:

- **La chaux libre : « CaO »: >2% (risque d'expansion).**
- **Périclase : « MgO » : >5% (risque d'expansion).**

### I.3.2 . Le gypse



**Figure I.3 :** Roche de gypse.

Le gypse est un minéral composé de sulfate hydraté de calcium de formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ . Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, ainsi qu'une roche évaporitique. Le nom vient du latin gypsum, emprunté au grec gypso, de même sens.

Le gypse est un minéral très commun des séries sédimentaires et peut former des roches mono minérales [8].

Tableau I.1: Composition chimique du gypse

composante	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
%	10.05	2.99	1.55	26.90	3.86	0.41	0.05	30.33	0.007

### I.3.3 . Additions minérales

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés est autorisée jusqu'à 1% [9].

### I.4 . Matières premières

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques chaux, silice, alumine et fer.

En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter, et combiner.

On peut utiliser aussi comme appoint des sous-produits d'autres industries tels les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques [7].

Les matières premières principales sont 80% de calcaire et moyen de 20% d'argile.



### I.4.1 . Calcaire



**Figure 1.4** : Roche de calcaire.

Le calcaire est une roche sédimenteuse produite par des organismes vivants.

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variable, ils proviennent du dépôt de  $\text{CaCO}_3$  contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues).

Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins [7].

Les calcaires dits « purs » contiennent au moins 95% de  $\text{CaCO}_3$  et les impuretés mentionnées ci-dessus jouent alors un rôle mineur [7].

#### I.4.1.1. Les impuretés

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont :

➤ **La silice**

Elle se présente sous plusieurs formes :

❖ **Libre** : Elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire.

---

❖ **Combinée** : Divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux [7].

➤ **La magnésie**

La magnésie est un élément dangereux du fait de son expansion ultérieure possible au sein du ciment hydraté [7].

➤ **Le fer**

Le fer rencontré le plus souvent sous forme d'oxyde  $Fe_2O_3$  ou de pyrite  $Fe_2S$ . Le fer joue un rôle utile de fondant [7].

➤ **Le salcalis**

Tels que soude et potasse sont volatilisés au moment de la clinkérisation et se retrouvent surtout dans les poussières du four, lesquelles sont actuellement souvent recyclées. Les alcalis peuvent provoquer certaines difficultés au cours de la fabrication du ciment [7].

On classe les calcaires comme suit :

- **Calcaire dur** : min 80 % de  $CaCO_3$  et max 5% de  $MgCO_3$ .
- **Calcaire mou (craie)** : 90 % en  $CaCO_3$ .

#### **I.4.2 . Eléments argileux calcaires**

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de faire leur dosage.

Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment portland en proportions voulues. Ces « pierres à ciments » sont évidemment très rares [7].

**I.4.3 . Argile**

**Figure I.5 : L'argile.**

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières. On distingue ainsi :

- les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.
- les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.

➤ **Classification des argiles**

Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes :

- ❖ **Groupe Kaolin:**  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ .
- ❖ **Groupe Halloysite:**  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ .

- ❖ **Groupe Montmorillonite:**  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .
- ❖ **Groupe des Minéraux Argileux Micacés.**
- ❖ **Groupe des Minéraux Argileux Magnésiens.**

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, sous forme de nodules, du sable,...). Là encore, les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée.

Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkérisation [7].

#### **I.4.4 . Matières auxiliaires**

Leur utilisation est sans cesse croissante, on distingue:

- Les matériaux correctifs, qui sont ajoutés au cru pour ajuster les teneurs en certains oxydes comme  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- Les régulateurs de prise du ciment.
- Les minéralisateurs.
- D'autres ajouts comme les fluidifiants et les entraîneurs d'air [10].

##### **I.4.4.1 . Les matériaux correctifs**

Des correcteurs sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) qui est un retardateur de prise est broyé avec le clinker.

- ✓ **Minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )**

Il existe des gisements de minerai de fer. A titre d'exemple les cimenteries de l'ouest Algérien sont alimentées par le minerai de Béni-Saf [11].

---

**✓ Bauxite**

La bauxite, minéral naturel utilisé pour produire l'aluminium, et l'un des éléments métalliques les plus abondants de la croûte terrestre. La bauxite extraite est transformée par affinage en alumine, qui est ensuite transformée en aluminium par électrolyse [12].

**✓ Le calcaire sableux**

Les calcaires sableux sont d'origine détritique. Leur composition est forte variable en fonction des roches dont elles sont issues. Ils contiennent beaucoup de silices [11].

**✓ Sable**

Le sable est fait de grains minéraux tous petits (pas plus de deux millimètres). C'est de la roche effritée par l'érosion [13].

**I.4.4.2 . Les minéralisateurs**

L'activation chimique du processus de cuisson se réalise grâce à des minéralisateurs accélérateurs qui mènent à une:

- Accélération de la décomposition de  $\text{CaCO}_3$ .
- Accélération des réactions à l'état solide par action sur le réseau cristallin.
- Diminution de la température de formation du clinker fondu.
- Augmentation de la quantité de la phase fondue.

**I.5 . Ajouts cimentaires**

L'utilisation accrue des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer la qualité de l'air.

Les ajouts cimentaires sont additionnés au clinker afin de produire un ciment mélangé ou additionnés au mélange de béton comme agent complémentaire.

**I.5.1 . Définition des ajouts cimentaires**

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant et après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer. Ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes

---

teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs [14].

### I.5.2 . Classification des ajouts

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de filler.

Tableau I.2 : Classification des ajouts selon leur réactivité [15].

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux hydraulique
Hydraulique latent		Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calcique)
pouzzolanique	Fortement réactif	Fumé de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres a diatomées)
	Faible réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives dispersions synthétique

### I.5.3 . Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaire

#### I.5.3.1 . Bénéfices écologiques et environnementaux

- ✓ diminution de l'émission du CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière.
- ✓ élimination des sous-produits de la nature.

#### I.5.3.2 . Bénéfices fonctionnels

- ✓ Incorporation des particules fines qui améliorent la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- ✓ Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- ✓ Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

### I.5.3.3 . Bénéfices économiques

- ✓ La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation).
- ✓ Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

### I.5.4 . Les différents types d'ajouts aux ciments

#### I.5.4.1 . Les cendres volantes(V)

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et phasiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (ASTM C 618-94a) [16].

- **Classe F.** contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux.
- **Classe C.** contenant entre 15 % et 35% de CaO produit de la combustion du lignite.

#### I.5.4.2 . La pouzzolane



Figure I.6 : La pouzzolane.

### I.5.4.2 .1. Définition

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise [17].

### I.5.4.2 .2 . Types de pouzzolane

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et artificiels :



**Figure I.7 :** Les différents types de pouzzolane.

#### a. Pouzzolane naturelle

##### ➤ Verre volcanique

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon [18].

##### ➤ Tufs volcaniques compacts

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des



---

conditions hydro thermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte [18].

**b. Pouzzolane artificielle**

➤ **Cendres volantes**

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937 [18].

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO) les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90% [18].

➤ **Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF)**

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment. Les analyses minéralogiques du LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100% [18].

➤ **Argiles calcinées**

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice [18].

➤ **Fumée de silice**

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la

---

granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique [18].

#### **I.5.4.3 . Effet de La pouzzolane**

##### **➤ A l'état frais**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [19].

##### **➤ A l'état durci**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.

#### **I.5.4.4 . Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésium et en chaux. Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes). D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [20].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques
- Broyage à une finesse plus élevée
- Traitement thermique

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes:

❖ **Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

❖ **Propriétés physiques de remplissage**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

#### **I.5.4.5 . Hydratation et réaction pouzzolanique**

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO, ce qui est le contraire pour le ciment portland.

Par conséquent, l'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO<sub>2</sub> du pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca(OH)<sub>2</sub> créée par l'hydratation du ciment portlands [21].

Les pouzzolanes ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et alumine de calcium hydraté développant des résistances.

La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker portland (CSH, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, C<sub>8</sub>AFH<sub>26</sub>, C<sub>6</sub>AS<sub>3</sub>H<sub>32</sub>).

Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée.

Au cours de l'hydratation du ciment portland il se forme sur chacun des grains une couche

---

de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du CSH), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes.

La situation est différente en présence de pouzzolanes Le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminate de calcium hydraté (CAH).

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes [22].

#### **I.5.4.6 . Différentes utilisations de la pouzzolane**

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

##### **a. L'agriculture**

###### **✓ La culture en plein champ**

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

###### **✓ Horticulture**

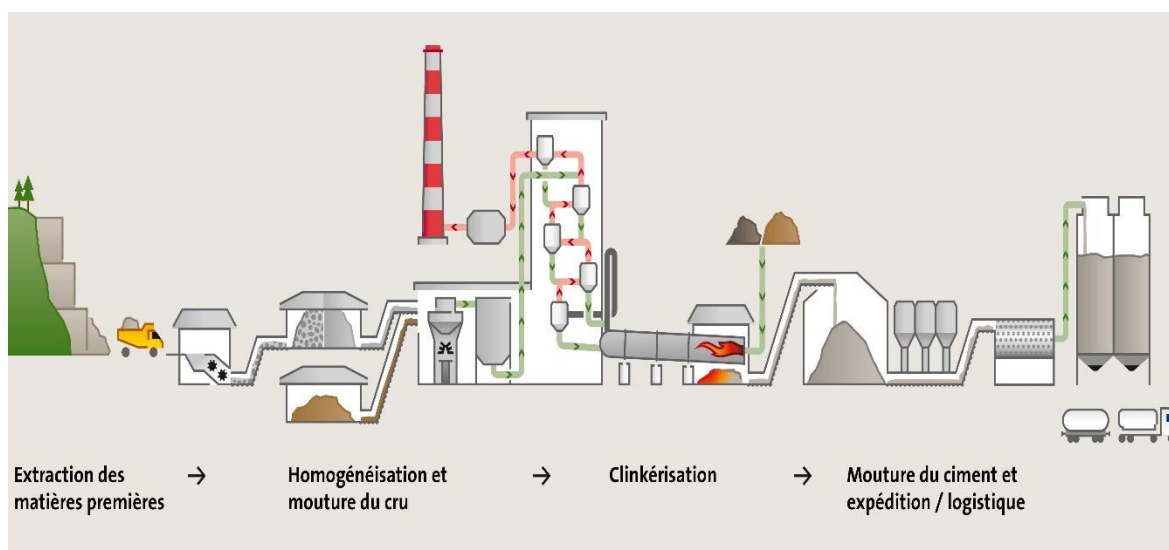
L'herbe pousse mal sur la pouzzolane, son caractère minéral met les toiles plastiques à l'abri des rayons ultraviolets pour la culture horticole en serre.

##### **b. Applications routières**

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel). Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée [23].

**c. Dans l'industrie**

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement) les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane.

**I.6 . Processus de fabrication du ciment**

**Figure I.8** : Processus de fabrication du ciment.

Plan du processus de la cimenterie de Béni-Saf :

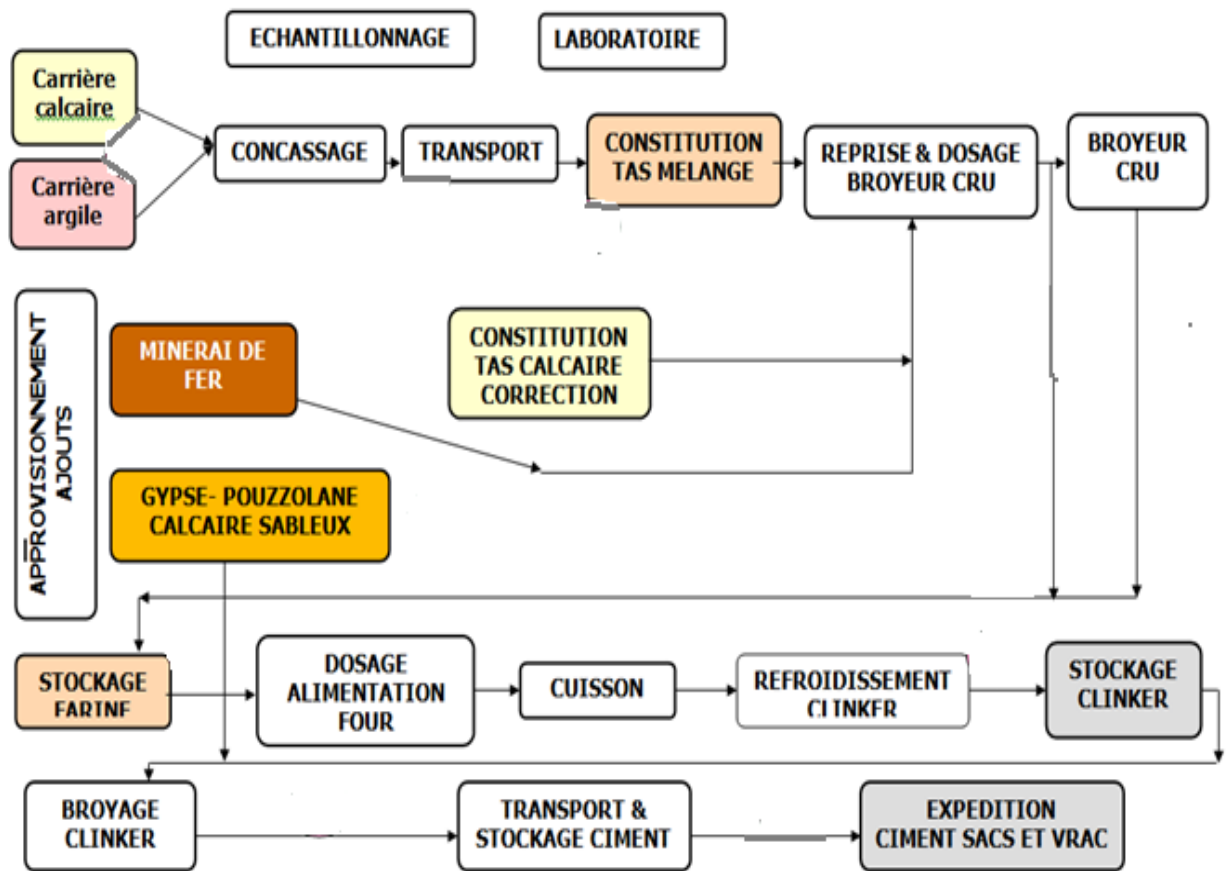


Figure I.9 : La fabrication du ciment –les étapes principales du processus par voie sèche.

I.6.1 . Extraction



Figure I.10 : Extraction.

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges comme le calcaire (75 à 80%) et l'argile (20 à 25%) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert.

Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des tombereaux ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) [24].

### **I.6.2 . Concassage**

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur.

Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté. Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile [25].

Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasif mais non collants. Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.
- Le concasseur giratoire.
- Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).
- Le concasseur à marteaux pour les matériaux friables à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de 10 à 20.



Figure I.11 : Concassage des matières premières au niveau de la carrière.

### I.6.3 . Le séchage et le broyage

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace. Ensuite, 3 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et semi-sèche [25].

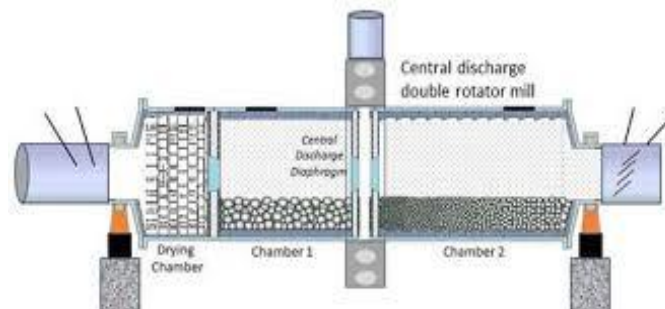


Figure I.12 : Broyeur.



### I.6.4 . Homogénéisation

C'est au cours de cette phase, que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, qu'on peut obtenir un produit, parfaitement homogène de caractéristique chimique uniforme.

### I.6.5 . La cuisson

La cuisson se fait à une température voisine de 1450°C dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné. La matière chemine lentement et se préchauffe le cru à environ 800°C. A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker.

- la décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de la chaux vive.
- l'argile se scinde en ses constituantes silices et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation.



Figure I.13 : Le four rotatif.

### I.6.6 . Broyage du clinker

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types des ciments normalisés [15].

### I.6.7 . Stockage, ensachage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches.



**Figure I.14** : Silos de stockage du ciment.

### I.6.8 . Les transporteurs

Le déplacement de la matière d'une installation à l'autre s'effectue à l'aide des transporteurs spécifique, chacun a son propre rôle. On peut distinguer : les transporteurs mécaniques, les transporteurs à bandes, les transporteurs à vis sans fin, les élévateurs à godets, et les transporteurs pneumatiques.

---

### **I.6.9 . Procédés de fabrication du ciment portland**

IL existe 4 méthodes de fabrication du ciment [26] :

- ❖ Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne)
- ❖ Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide)
- ❖ Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée)
- ❖ Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche)

#### **I.6.9.1 . Procédés en voie sèche et semi-sèche**

Les matières premières, dans des proportions soigneusement contrôlées, sont broyées et homogénéisées de façon à former un mélange de composition chimique requise. Dans la voie sèche et semi-sèche, elles sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four du refroidisseur. Un four auxiliaire peut être nécessaire pour fournir le complément de chaleur nécessaire si les matières premières contiennent une forte proportion d'humidité et pour le démarrage du four.

#### **I.6.9.2 . En voie humide ou semi-humide**

Dans le procédé par voie humide, la matière première est additionnée d'eau dès le broyage et manipulée sous forme de pâte fluide introduite par pompage dans des fours rotatifs longs de 100 à 200 m.

Ce procédé présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie de plus que le procédé par voie sèche.

Dans le procédé par voie semi-sèche, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée comme précédemment.

### **I.7 . Hydratation du ciment**

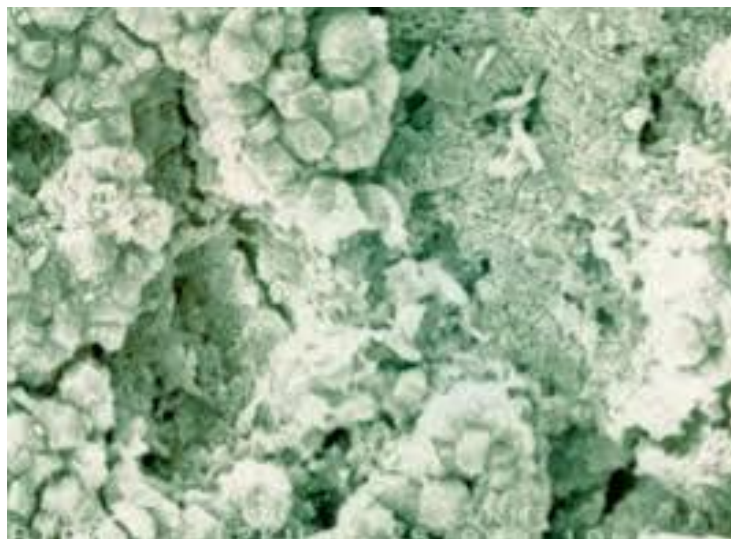
#### **I.7.1 . Hydratation et prise du ciment Portland(CPA)**

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe, qui a été étudié pour la première fois par Henri Lechatelier (1887). Schématiquement, Lechatelier a décrit trois étapes relatives à la prise du ciment [27]:

- ❖ L'adsorption physique et chimique de l'eau par les grains du ciment.
- ❖ La dissolution ou solvatation, des grains de ciment ou phases anhydres, en présence d'eau.
- ❖ La précipitation des phases hydratées.

Pour décrire l'hydratation du ciment, différents travaux ont été publiés concernant des phases pures comme l'alite,  $C_3S$  [14,15], la bélite,  $C_2S$  [16], l'aluminate tricalcique,  $C_3A$  [17,18], ou encore la phase alumino-ferritique,  $C_4AF$  [26].

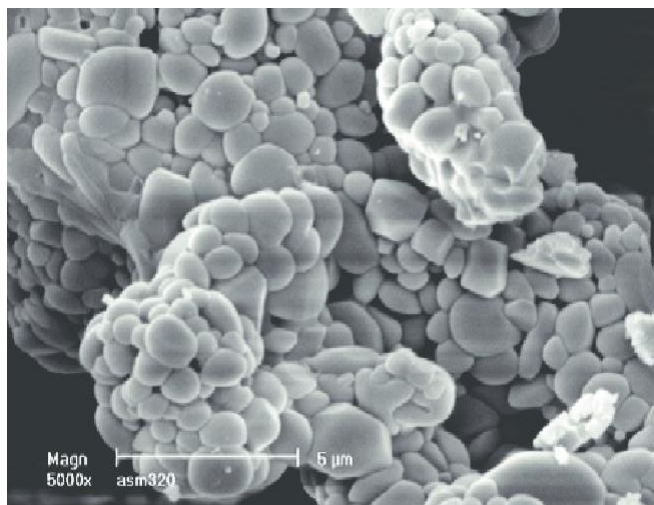
### I.7.2 . Hydratation du Silicate tricalcique $C_3S$



**Figure I.15 :** Silicate tricalcique  $C_3S$ .

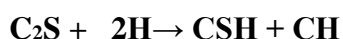
Pour la phase  $C_3S$ , dès son mélange avec l'eau, des ions calcium, hydroxydes et silicates passent en solution. La solution devient alors rapidement sursaturée par rapport aux phases hydratées, à savoir l'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$  encore appelé- portlandite, noté CH, ainsi que des hydrates silico-calciques, notés CSH qui sont des composés non stœchiométriques. Ou le rapport C/S varie entre 1,5 et 1,8. Les hydrates CSH ont les propriétés d'un gel. Une partie des ions  $(SO_4)^{2-}$  provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre H et permet d'améliorer sa résistance [27].

### I.7.3 . Hydratation du silicate bicalcique C<sub>2</sub>S



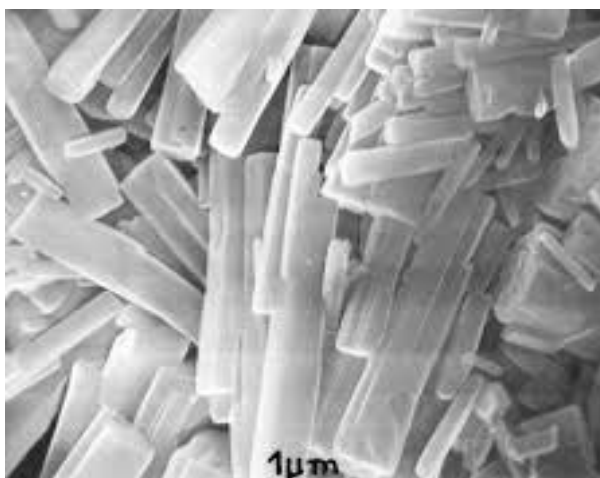
**Figure I.16** : Silicate bi calcique C<sub>2</sub>S.

Une fois hydraté, C<sub>2</sub>S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C<sub>3</sub>S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie, l'hydratation de C<sub>3</sub>S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C<sub>2</sub>S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C<sub>2</sub>S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C<sub>3</sub>S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée [28].

### I.7.4 . Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A



**Figure I.17** : La microscopie de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A.

La réaction est donnée par:



L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). En l'absence du gypse, la réaction de  $C_3A$  avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les  $C_3A$  réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base hexagonale [28].

### I.7.5 . Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique $C_4AF$

Le  $C_4AF$  réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de  $C_3A$ , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Le  $C_4AF$  produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de  $C_4AF$  pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces derniers occupent environ 15- 20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du  $C_4AF$  dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [28].

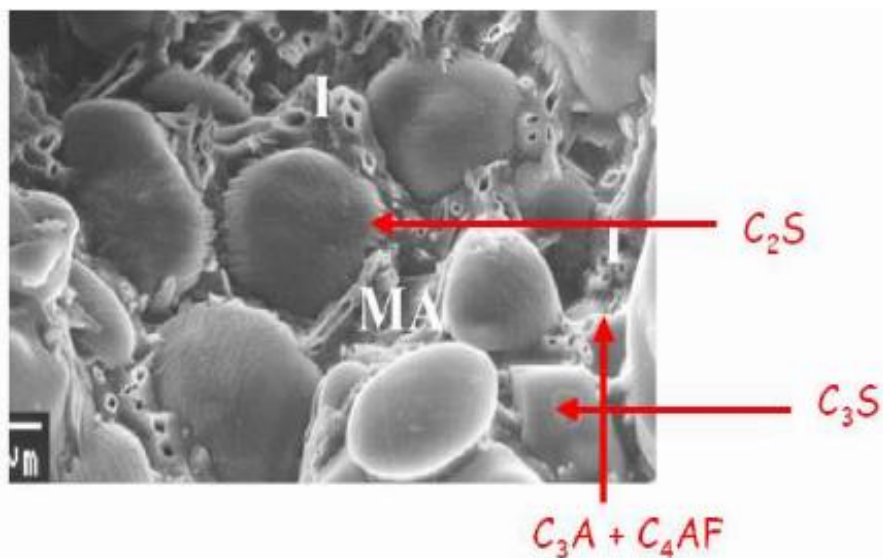


Figure I.18 : Etude physicochimique du ciment.

## I.8 . Classification des ciments

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale [29]:

**I.8.1 . Classification des ciments en fonction de leur composition**

Les ciments constitué du clinker et des constituants énumérés, sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux, ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffre romains dans leur notation européenne (voir la norme (EN-197-1-2000)) (sols, granulats...) :

- ❖ **CEM I** : ciment Portland (CPA) → constituant secondaire 5 % et Clinker 95 %
- ❖ **CEM II** : ciment Portland composé (CPJ) → **A** entre 6 à 20%, **B** entre 21 à 35 % Clinker
- ❖ **CEM III** : ciment haut Fournaux (CHF) → **A** 36 à 65 % Laitier, **B** 66 à 80 % Laitier, **C** 81 à 95 % Laitier, Clinker
- ❖ **CEM IV** : ciment pouzzolanique (CPZ)
- ❖ **CEM V** : ciment composé (ou ciment au laitier et aux cendres: CLC)

**I.8.2 . Classification des ciments en fonction de leur résistance normale**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Ces classes sont notées, classe 32,5 classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et les valeurs garanties selon le tableau I.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [30].

**Tableau I.3** : Classification du ciment en fonction de leur résistance.

<b>Résistance à la compression (MPa)</b>		
<b>Classe de résistance</b>	<b>2 jours inf.</b>	<b>28 jours inf.</b>
32.5(Normale) 32.5 (Rapide)	- $\geq 13.5$	$\geq 32.5 \geq 32.5$
42.5 42.5 R	$\geq 12.5 \geq 20$	$\geq 42.5 \geq 42.5$
52.5 52.5 R	$\geq 20 \geq 30$	$\geq 52.5 \geq 52.5$

### I.8.3 . Propriétés des ciments

Tableau I.4 : Caractéristiques du ciment [30].

Caractéristiques du ciment	Valeur
Masse volumique apparente[g/cm <sup>3</sup> ]	0.80 à 1.30
Masse volumique absolue[g/cm <sup>3</sup> ]	2.90 à 3.15
Surface spécifique Blaine[g/cm <sup>2</sup> ]	2.70 à 5.00

Le ciment durci est une véritable "roche artificielle" qui évolue dans le temps passant par trois phases [2] :

- **Phase dormante** : où la pâte pure (ciment et eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent; mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.
- **Début et fin de prise** : après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ( $S = 1 \text{ mm}^2$ , masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les ciments de classe 35 et 45 ont un  $T_{\text{prise}}$  supérieur à 1h30 à  $T = 20^\circ\text{C}$ . En revanche, les ciments de classe 55 et HP ont un  $T_{\text{prise}}$  supérieur à 1h30 à la même température.

- **Durcissement** : on a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

#### ➤ Le retrait

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme 4x4x16 cm sur mortier normal. Le retrait limité à 0,8 mm/m pour les ciments CPA et CPJ de classe 45R et 55. Il n'est pas normalisé pour les autres ciments (CLK, CHF, CLC) [30].



**➤ L'expansion**

Se mesure grâce aux aiguilles de Lechatelier. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments [30].

**I.8.4 . Les différents types des ciments spéciaux**

Il existe plusieurs types de ciments spéciaux, la plupart contiennent du ciment portland [31]. Il s'agit notamment de ceux qui suivent ci-après :

- Ciment à maçonner.
- Ciment plastique.
- Ciment expansif (à retrait compensé).
- Ciments pour puits de pétrole.
- Ciment Portland imperméabilisant.
- Ciment à prise contrôlée.
- Ciments géo polymériques.
- Ciments au phosphate de magnésium.
- Ciments au soufre.
- Ciment blanc.
- Ciment de laitier.
- Ciments naturels.
- Ciment prompt.
- Le Ciment alumineux.

**I.9 . Les ajouts minéraux**

Les ajouts minéraux sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive et amorphe. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils

---

s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ainsi, ils peuvent posséder des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydraté (C-S-H), qui sont responsables des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

L'utilisation des ajouts minéraux dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique [32].

### **I.9.1 . Les fonctions des fillers**

#### **➤ Dans les ciments**

Les ciments dans lesquels on introduit les fillers appartiennent à une classe de résistance inférieure ou moyenne.

- Les ciments fillérisés, CPJ sont avant tout des ciments d'intérêt économique et écologique. Ils permettent l'utilisation des cendres volantes et des laitiers qui sont des sous-produits industriels. Ils peuvent contenir aussi des fillers naturels (calcaires, pouzzolanes). Leur fabrication ne doit pas entraîner de surcoût.
- Les ciments aux laitiers et aux cendres (CLC), les ciments de hauts fourneaux (CHF) et les ciments de laitier au clinker (CLK) dont la chaleur d'hydratation est faible et dont les ajouts ont des propriétés pouzzolaniques confèrent au matériau final une durabilité intéressante. Ils sont utilisés dans les milieux agressifs : constructions en eau de mer [33].

### I.9.2 . Les fillers calcaires



**Figure I.19 :** Fillers calcaires.

Ils sont constitués de calcaire broyé. Leur principale fonction est un rôle de remplissage. Une partie du clinker peut être remplacée sans grand impact sur les propriétés finales par un matériau pratiquement inerte comme le carbonate de calcium qui a une bonne affinité pour les hydrates du ciment. En fait, les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ils conduisent à la formation de carbo-aluminates de calcium [33].

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines a granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leur défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [34].

### I.9.3 . La Poudre de Brique



**Figure I.20** : Poudre de Brique.

Aujourd'hui on utilise les déchets de briques comme des ajouts minéraux dans les mortiers et les bétons on appelle ça le recyclage. Ils sont broyés jusqu'à la fraction granulaire inférieure à  $80\mu\text{m}$  (ils sont utilisés comme poudre).

Les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes ou cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions [36].

[Bourmatte; 2004] a étudié la possibilité d'utiliser des granulats recyclés de déchets de briques dans la composition des mortiers. Le taux de substitution en granulats recyclés est de (0, 25, 50, 75 et 100%). Les résultats indiquent que Plus le taux de substitution augmente plus la résistance en compression diminue, alors on peut utiliser ces granulats avec des taux limités dans le mortier [37].

[M. Heikal ; 2013] a étudié l'influence de la substitution du ciment par les déchets de brique pilées et a trouvé que plus on augmente la teneur en poudre de brique plus la résistance à la compression augmente et les contraintes de cisaillement augmentent aussi, ainsi que la micro structure de la poudre de brique ciment affiche un arrangement dense de microcristalline C-S-H et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui améliore la résistance à la compression [38].

[Abib ; 2013] a étudié l'influence de l'introduction de (5, 10, 15) % de déchets de brique pilée sur le comportement rhéologique et mécanique du mortier. Les résultats montrent que la poudre de brique réduit la chaleur d'hydratation et un dosage de 5 % dans le mortier a une influence favorable sur la résistance en flexion et compression par rapport les autres dosages (10%, 15%) [39].

**Tableau I.5 :** Composition minéralogique de déchets de briques.

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P.F
Teneurs de déchets de briques (%)	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	/	1.00

## I.10 . Conclusion

Les données et les informations ramenées dans ce chapitre sont utiles. Ils nous permettent mieux comprendre l'interaction entre le type du ciment utilisé et l'environnement auquel il sera exposé.

Le ciment est un liant hydraulique qui répand très bien au but de la durabilité, on doit choisir très bien le dosage du ciment et sa classe de résistance, ces deux paramètres jouent un rôle très important sur le comportement des matériaux cimentaires avec les milieux chimiquement agressifs.

## **Chapitre II.**

---

# **CARACTERISTIQUES DES MORTIERS**

---

## II.1 . Définition

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon.

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différent selon les réalisations [40].

Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement [41].

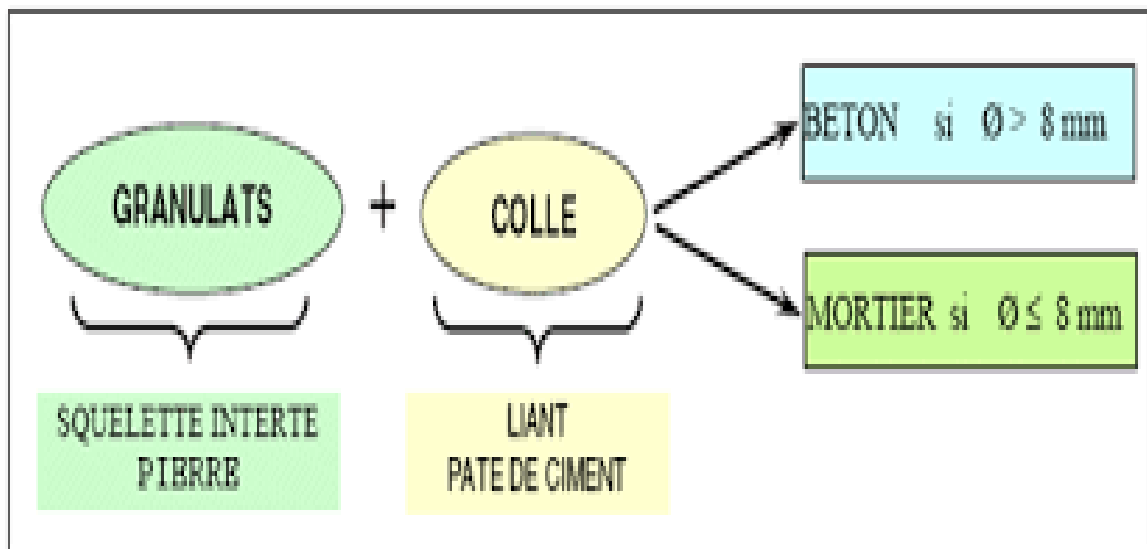


Figure II.1 : L'obtention et constituants des mortiers

## II.2 . Constituants des mortiers

### II.2.1 . Le Liant

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être du ciment (chapitre I), cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson [42].

Généralement, on peut utiliser:

- Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt,...).
- Les liants à maçonner.
- Les chaux hydrauliques naturelles.
- Les chaux éteintes.

### II.2.2 . Le sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans la nature sous la forme de grains ou de poudre, ce matériau est groupé en deux familles des sables grossiers et des sables fins Il existe plusieurs types de sables suivant leur composition, il y a blancs, jaunes, gris et rougeâtres.

On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements: il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut [43].

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant à cela, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils



jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume du sable humide [43].

### **II.2.3 . L'eau de gâchage**

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours, le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé.

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers sont précisées dans la norme **NA-442**. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale [43].

## **II.3 . Le rôle d'utilisation du mortier**

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels :

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- Sous forme d'enduits aériens.
- Sous forme d'écrans étanches.
- Constituer des chapes d'usure pour dallages en béton.

Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux divers éléments moulés [44].

---

## II.4 . Classification des mortiers

La classification des mortiers est comme suite:

### II.4.1 . Classification générale des mortiers

- **Selon leur domaine d'utilisation**

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, on peut citer les catégories suivantes:

- ✓ Mortier de pose.
- ✓ Mortier de joints.
- ✓ Mortier pour les crépis
- ✓ Mortier pour le sol.
- ✓ Mortier pour les stucs.
- ✓ Pierres artificielles.

Support pour les peintures murales.

- ✓ Mortier d'injection.
- ✓ Mortier pour les mosaïques.
- ✓ Mortier de réparation pour pierres [45].

- **Selon la nature du liant**

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

- **Mortier de ciment portland**

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers du ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables [45].

➤ **Mortier de chaux**

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air, ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide [45].

➤ **Mortiers bâtards**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, dans les proportions égales, suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées [45].

➤ **Mortier à base de ciment de maçonnerie**

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers du ciment. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants [45].

➤ **Le Mortier réfractaire**

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues [4].

➤ **Le Mortier rapide**

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements [4].

➤ **Le Mortier industriel**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de

---

mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- ❖ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- ❖ Mortiers d'imperméabilisation.
- ❖ Mortier d'isolation thermique.
- ❖ Mortier de jointoiement.
- ❖ Mortier de ragréage.
- ❖ Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- ❖ Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- ❖ Mortier de réparation [4].

## II.5 . Classes des mortiers

- ✓ **Classe 1** : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- ✓ **Classe 2** : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- ✓ **Classe 3** : Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- ✓ **Classe 4** : Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- ✓ **Classe 5** : Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.
- ✓ **Classe 6** : Adjuvant modifiant des propriétés spéciales [46].

## II.6 . Préparation des mortiers

Les quantités nécessaires en fonction des dosages et des travaux réalisés sont montrés sur le tableaux II.1 ci-dessous [47] :

**Tableau II.1:** Dosages des mortiers.

Sable (g)	Ciment (g)	Eau (g)
1350	450	225

- Prévoir une surface de gâchage plate et assez grande, balayer cette aire de gâchage au balai de chantier, elle doit être propre et surtout sans débris végétaux.
- Installer la bétonnière ou le seau de maçon à proximité des produits.
- Prévoir un tuyau d'alimentation en eau muni d'un robinet d'arrêt.
- Déposer sur l'aire prévue à cet effet la quantité du sable.
- Verser le ciment (ou la chaux) sur le sable.
- Commencer à mélanger à la pelle le sable et le ciment. Afin d'obtenir un bon mélange, déplacer le tas deux ou trois fois. Le mélange doit être de couleur homogène.
- Creuser le tas en cratère et verser 2/3 de l'eau prévue.
- Faire tomber peu à peu les bords du cratère dans l'eau pour humidifier le mélange.
- Mélanger le tas afin de répartir l'eau. Pour homogénéiser le mélange, le déplacer deux ou trois fois comme pour le mélange à sec.
- Couper le dessus du tas du mortier avec la pelle. S'il ne se forme pas de **boudins**, ajouter un peu d'eau et mélanger à nouveau.
- Le mortier est correctement humidifié lorsqu'on passe le plat de la pelle dessus, il se lisse et l'eau remonte en surface [47].

## II.7 . Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont [48] :

### II.7.1 . Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure du ciment de consistance Normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même Appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains du sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur [48].

### II.7.2 . Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  conservés dans l'eau à  $20^\circ \text{C}$ . Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression.

Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours [48].

### II.7.3 . Retraits et gonflements

#### ➤ Le Retrait

Les retraites se mesurent sur des prismes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démolage, dans une enceinte à  $20^\circ \text{C}$  et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours. Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la Pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment) [48].

#### ➤ Le gonflement

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  conservées dans l'eau à  $20^\circ \text{C}$ . Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de LeChatelier inférieure sur pâte pure à 10mm) [48].

## II.8 . Définition des caractéristiques des additions

La norme européenne EN 206-1(NF P 18-325) de février 2002, distingue les additions en deux types : celles quasiment inertes (de type I) et celles à caractère pouzzolanique ou à caractère hydraulique latent (de type II).

Comme additions de type I sont considérés en premier lieu les fillers dont les caractéristiques spécifiques sont déterminées par la pré-norme prEN 12620 (2000) ainsi que les pigments pour le béton conformes à la norme EN 12878.

Comme additions de type II sont considérés les fumées de silice conformes à la pré-norme prEN 13263(1998) et les cendres volantes conformes à la norme EN 450.

Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition ((additions pour béton hydraulique)) à savoir :

### ❖ Additions de type I selon la norme EN 206-1

- Les additions calcaires (NF P 18308)
- Les additions siliceuses (NF P 18- 509)
- Les fillers (NF P 18-501)

### ❖ Additions de type II selon la norme EN 206-1

- La fumée de silice (NF P 78-502)
- Les cendres volantes de houille (NF P 18505)
- Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506) [49].

## II.9 . Les essais mécaniques sur le mortier

### II.9.1 . Essai de compression

#### ➤ But de l'essai

Le but est de déterminer la résistance à la compression du mortier.

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 160x40x40 mm<sup>3</sup> conservés dans l'eau ou dans une solution acide et ou basique. Les éprouvettes sont rompues par flexion puis en compression.

Les résistances, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

#### ➤ Objet

Cette instruction a pour objet la détermination des résistances mécaniques à la

compression sur mortier de ciment, selon les spécifications de la norme européenne **EN 196-1**.

➤ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique, la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

➤ **la confection des éprouvettes**

Pour la préparation des éprouvettes, nous avons procédé de la façon suivante :

- Préparer une série des moules des dimensions  $16 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  (Figure II.2) convenables, avec la quantité du mortier.



**Figure II.2** : Les moules des mortiers.

- Huiler les moules et vérifier leurs serrages.
- Placer les moules sur une table vibrante.
- Remplir les moules par le mortier, l'exécuter en deux couches.
- Compacter le mortier à l'aide d'une table vibrante (Figure II.4), en appliquant 120 secondes.

Il faut qu'elle soit bien arasée à l'aide d'une règle métallique et placée lentement sur la face du moule.

- Conserver les moules dans la chambre d'humidité jusqu'au démoulage.
- Démouler les moules après 24 heures de leur confection.





**Figure II.3 :** Malaxeur.



**Figure II.4 :** Table vibrante.

## ❖ Expression des résultats

On retient pour la charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai (figure II.5 et figure II.6) on calcule la résistance (R) par la relation suivante :

$$R = F/S$$

Avec :

**F**: est la charge maximale (en KN).

**S**: est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carrée.

**R**: la résistance à la compression exprimée en MPa.



**Figure II.5** : L'appareil de compression.



Figure (a)

Figure (b)

**Figure II.6** : L'appareil de flexion, figures (a) et (b).

## II.10 . Attaques chimiques des bétons

Le béton est durable dans la plupart des milieux naturels, par contre en cas d'un milieu acide comme une pluie acide, contact avec un milieu fortement acide (centre nucléaires, agricoles), le stockage des produits chimiques, ces milieux présentent des problèmes de durabilité dus aux attaques chimiques.

Les attaques chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [50]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les différents acides.

### II.10.1 . Actions des acides

La solution interstitielle du béton est basique (pH de 13), en contact avec une solution acide (pH inférieur à 7), l'équilibre chimique des hydrates comme la portlandite et les silicates du calcium hydraté C-S-H se déstabilise, ce qui influe sur la stabilité de la matrice cimentaire. La durabilité d'un matériau cimentaire dans un milieu acide dépend de plusieurs facteurs tels que :

- Type de ciment, composition et l'utilisation des ajouts cimentaires.

- Type de granulats : gravier, sable, calcaire...
- La durée et les conditions de cures.
- L'acidité, type et le pH du milieu agressif. [51] [53] [52] [54].

### II.10.2 . Mécanisme d'attaque

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

L'acide sulfurique (**formule II.1**) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



**Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau**

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. (**formule II.2**) décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte du ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [55].

### **II.11 . Influence des ajouts minéraux sur la résistance des mortiers aux attaques acides**

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de l'attaque basique (lixiviation) et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des CSH plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [56]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [53] [57].

## **Chapitre III.**

---

# **IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET MORTIERS**

---

### III.1 . Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux utilisés Les caractéristiques physiques, Les caractéristiques chimiques, entrant dans la composition des mortiers à confectionner et cela par des essais au laboratoire, ces matériaux sont purement locaux.

Les matériaux utilisés dans ce projet pour mortier normalisée et mortier en ajout sont :Le ciment CEM II/A 42,5 de la cimenterie de Béni-Saf appartenant à la wilaya de Ain-Temouchent, le sable de MAZZERI de la carrière de TAGEMA région de Tlemcen, les ajouts en Fillers Calcaires <80  $\mu\text{m}$  et Poudre de Brique <80  $\mu\text{m}$  et l'eau.

### III.2 . Caractéristiques des Matériaux

#### III.2.1. Sable

Nous avons utilisé un seul type du sable de MAZZARI (Tlemcen).

##### III.2.1.1 . La Masse Volumique

Détermination de la masse volumique absolue et apparente d'un sable selon la norme NF P18 -560.

##### III.2.1.1.1. La Masse Volumique Apparente

**Matériel Nécessaire :**

- Un entonnoir monté sur trépied
- Un récipient
- Une règle à araser.
- une balance



**Figure III.1:** Essai de la masse volumique apparente.

**Mode Opérateur :**

1. Peser le récipient vide  **$M_0 = 0,437 \text{ kg}$** .
2. Verser granulat au travers de l'entonnoir jusqu'à refus
3. Araser et peser  **$M_1$**
4. La masse de granulat est  **$M_1 - M_0$**

La volumique apparente est calculée par la formule suivante :  $\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V}$

**Tableau III.1** : Essai de la masse volumique apparente du sable.

Masse volumique apparente	
Echantillon	Sable
Volume mesuré	1litre
1 <sup>er</sup> pesée (kg)	1,494
2 <sup>ème</sup> pesée (kg)	1,521
3 <sup>ème</sup> pesée (kg)	1,490
$\rho_{App}$ moy (kg/m <sup>3</sup> )	<b>1500</b>

### III.2.1.1 .2. La Masse Volumique Absolue

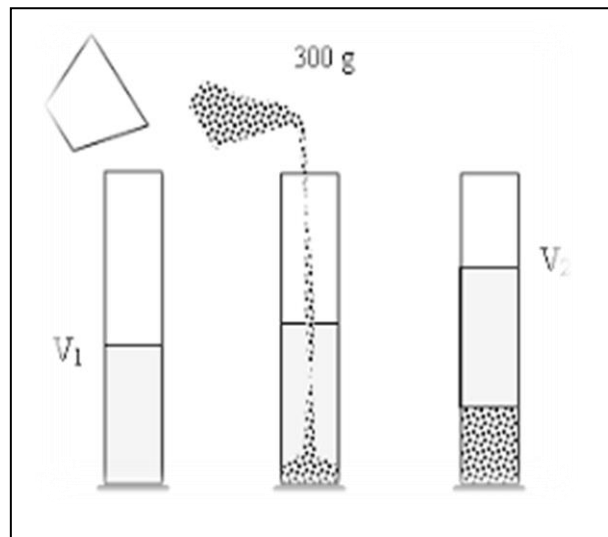
Mesurer la masse volumique absolue du sable de carrière par deux méthodes, la méthode de l'éprouvette graduée et la méthode du ballon.

#### Matériel Utilisés :

- Un récipient
- Un entonnoir
- Une balance

#### Matériaux Utilisés :

- Un échantillon du sable



**Figure III.2:** Essai de la masse volumique absolue à la méthode l'éprouvette graduée.

#### Mode Opérateur :

- Remplir l'éprouvette avec un volume d'eau  $v_1 = 1L$ .
- Peser un échantillon sec  $M = 300g$  de granulats.
- Introduire le granulat dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air.
- Lire le nouveau  $v_2$ .
- Calculer la masse volumique absolue :  $M/v_2 - v$



Tableau III.2 : Masse volumique absolue du sable par la méthode de l'éprouvette graduée.

Méthode de l'éprouvette graduée		
Echantillon	Sable	
	Masse (g)	Vol <sub>abs</sub> (ml)
1 <sup>er</sup> essai	300	120
2 <sup>ème</sup> essai	300	120
3 <sup>émé</sup> essai	300	120
$\rho_{abs}$ moy (kg/m <sup>3</sup> )	2500	

Tableau III.3 : Masse volumique absolue du sable par la méthode du ballon.

Essais	Méthode du ballon			
	Sable			
	Ballon+eau M1 (g)	Echantillon M2 (g)	Ballon+eau+echantillon M3 (g)	Volume de l'échantillon V (l)
1 <sup>er</sup> essai	1616	400	1874	0,142
2 <sup>ème</sup> essai	1630	400	1866	0,164
3 <sup>émé</sup> essai	1603	400	1851	0,152
$\rho_{abs}$ moy (kg/m <sup>3</sup> )	2600			



Figure III.3 : Essai de la masse volumique absolue du sable par la méthode du ballon.

### III.2.1.2 . L'absorption de l'eau par le sable

A été déterminée selon la norme **NF P18-555**, tout en humidifiant le sable par une petite quantité d'eau par la suite on la sèche à l'aide d'un séchoir et après avoir terminé on met le sable dans un cône afin de déterminer son affaissement.



**Figure III.4** : Essai d'absorption d'eau par le sable.

$$\text{Coefficient d'absorption(\%)} = \frac{M_s - M_h}{M_s} * 100 = \frac{200 - 195.8}{200} * 100$$

$$\text{Coefficient d'absorption(\%)} = 2.10$$

### III.2.1.3. L'analyse granulométrique par tamisage du sable

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition d'un matériau suivant leurs dimensions, les conditions de manipulations sont décrites par la norme **NF P 18-560**.

#### Principe d'Essai :

- L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.
- Les masses des différents refus et tamisât sont rapportés à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

**Résultats :** **M1** =1000g, **M2**=978,8g

**M1**: la masse avant le lavage du sable (masse principale).

**M2** : la masse après le lavage et l'étuvage du sable.



Figure III.5 : Essai d'analyse granulométrique du sable.

Tableau III.4: Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Ouverture des tamis	Masse des refus $M_i$ (g)	Masse des refus cumulés $M_c$ (g)	pourcentage des refus cumulés $Pr=(M_c/M)*100$	pourcentage des tamisat cumulés $Pt=100-Pr$
<b>6,3</b>	0	0	0,0%	100,0%
<b>5</b>	0	0	0,0%	100,0%
<b>4</b>	0	0	0,0%	100,0%
<b>3,15</b>	25,6	25,6	2,6%	97,4%
<b>2,5</b>	64,2	89,8	9,2%	90,8%
<b>2</b>	63	152,8	15,6%	84,4%
<b>1,6</b>	72,4	225,2	23,0%	77,0%
<b>1,25</b>	110	335,2	34,2%	65,8%
<b>1</b>	90	425,2	43,4%	56,6%
<b>0,8</b>	4	429,2	43,8%	56,2%
<b>0,63</b>	20	449,2	45,9%	54,1%
<b>0,5</b>	60,2	509,4	52,0%	48,0%
<b>0,4</b>	57,2	566,6	57,9%	42,1%
<b>0,315</b>	35,1	601,7	61,5%	38,5%
<b>0,25</b>	10	611,7	62,5%	37,5%
<b>0,2</b>	67,6	679,3	69,4%	30,6%
<b>0,16</b>	30	709,3	72,5%	27,5%
<b>0,125</b>	67,8	777,1	79,4%	20,6%
<b>0,1</b>	33,2	810,3	82,8%	17,2%
<b>0,08</b>	33,4	843,7	86,2%	13,8%
<b>0,063</b>	135,1	978,8	100,0%	0,0%
<b>fond</b>	0	978,8	100,0%	0,0%

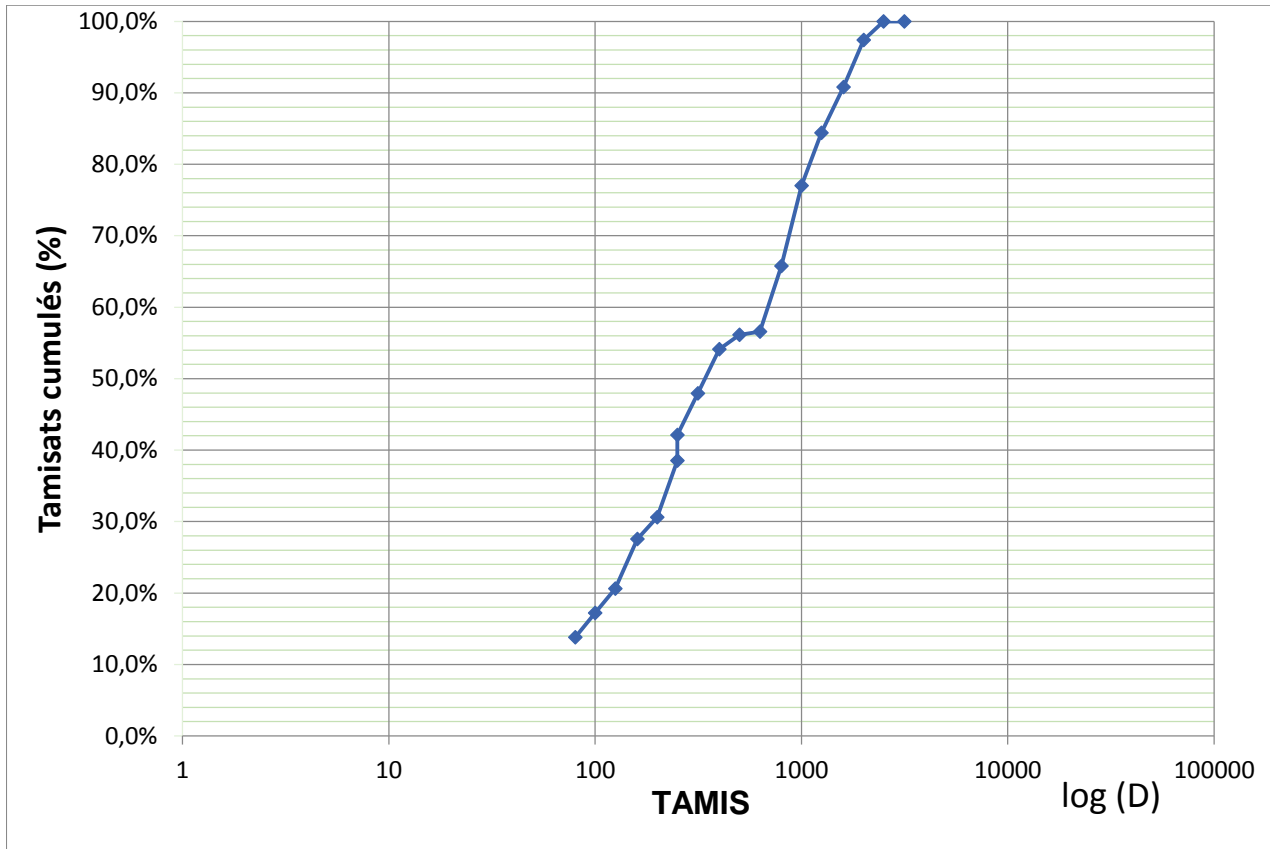


Figure III.6 : Courbe granulométrique du sable.

- **Module de finesse**

Le module de finesse ( $M_f$ ) est une facture très importante qui nous renseigne sur la qualité du sable.

Tableau III.5 : Classement du sable.

Quantité de sable	Modèle de finesse
<b>Fin</b>	1.8 - 2.2
<b>Préférentiel</b>	2.2 - 2.8
<b>Un peu grossier</b>	2.8 - 3.3

Le module de finesse est calculé par la relation suivante :

$$M_f = \frac{\sum \text{Pourcentage refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 4}{100}$$

$$M_f = 2.23$$

Module de finesse est entre 2.2 – 2.8 → Donc notre sable est un **sable préférentiel**.

- **Pourcentage des fines**

$$\% \text{ des fines} = \frac{\text{Masse des refus } M_i \text{ de tami } 0.063}{M_2 \text{ (la masse après le lavage et l'étuvage du sable)}} * 100$$

$$\% \text{ des fines} = 13.80 \%$$

### III.2.1.4 . Equivalant du sable

Mesurer la propreté du sable en déterminant le pourcentage d'éléments fins contenus dans le sable (NF P18-598).

#### Matériel Utilisé :

Matériel spécifique pour l'essai d'équivalent du sable

- Tamis de 5 mm et fond.
- Eprouvettes en plexiglas avec deux traits repères.
- Entonnoir pour introduction du sable
- Réglette et piston taré
- Réservoir de solution lavant(1)
- Tube laveur métallique plongeant.
- Machine d'agitation
- Chronomètre
- Piston taré à masse coulissante de 1 kg



**Figure III.7 : Matériel utilisé**

#### Mode opératoire :

- Le sable est tamisé à 5 mm.
- Remplir les éprouvettes avec la solution lavant jusqu'au premier trait.
- Verser 120 g du sable sec en veillant à éliminer les bulles d'air. Laisser reposer 10min.

- Boucher les éprouvettes et les agiter avec la machine d'agitation (90 allers et retours en 30 secondes (effectués de manière automatique par la machine).
- Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur. Pour cela, rincer le bouchon au-dessus de l'éprouvette, faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette. Laver le sable en faisant descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure.
- Sortir le tube laveur lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur. Laisser reposer pendant 20 minutes en évitant toute vibration.
- Mesurer à vue les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  (pour déterminer ESV).
- Faire descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat jusqu'à ce qu'il se mobilise au contact du sable. Le manchon prend appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. Mesurer  $h'_2$ .

$$ESV = 100 * \frac{h'_2}{h_1}$$

$$ESP = 100 * \frac{h_2}{h_1}$$

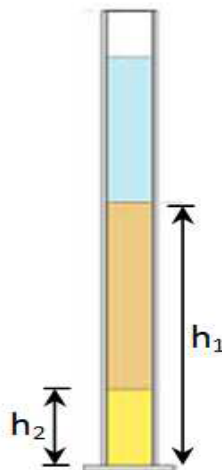


Figure III.8 : ESV

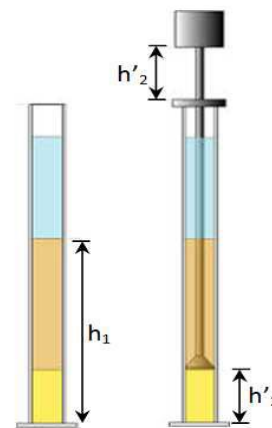


Figure III.9 : ESP

**ESV** : Equivalent du sable visuel

**ESP** : Equivalent du sable piston

Tableau III.6 : L'essai de l'équivalent du sable.

Essais	Hauteur total $h_1$ (cm)	Hauteur du sable $h_2$ (cm)	Hauteur $h'_2$ (cm)	ESV ( $100 \cdot h_2/h_1$ )	ESP ( $100 \cdot h'_2/h_1$ )
1 <sup>er</sup> essai	17	11,5	10	67,65	58,82
2 <sup>ème</sup> essai	17,5	11	11,2	62,29	64,00
			<b>La moyenne des essais</b>	<b>65</b>	<b>61,41</b>



Figure III.10 : Essai d'équivalent du sable.

D'après les résultats obtenus on classe le sable comme suivant:

Esv Nature et qualité du sable

- $60 < \text{Esp} < 65$  sable argileux n'est pas utilisable au béton.
- $75 > \text{Esv} > 65$  et  $70 > \text{Esp} > 60$  sable argileux utilisable au béton.
- $80 > \text{Esv} > 75$  et  $80 > \text{Esp} > 70$  sable propre utilisable au béton.
- $75 > \text{Esv} = 65 > 65$  et  $70 > \text{Esp} = 61.41 > 60$  sable argileux utilisable au béton.

### III.2.1.5 . Foisonnement du sable et teneur en eau

L'importance du foisonnement dépend du pourcentage d'humidité présent dans le sable et de la finesse de celui-ci. L'augmentation de volume d'un sable humide, par rapport au volume occupé par un sable saturé et sec en surface.

#### Matériel nécessaire

- Un récipient cubique ou cylindrique de volume 1 l.
- Une règle à araser métallique- une main écope pour le remplissage.
- Une balance de portée 5 kg, précision 1g.
- Une pissette.
- Un entonnoir.
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.
- Une petite spatule.

#### Matériaux utilisés

- un échantillon de 2000 g du sable sec

Utiliser des échantillons préalablement séchés à l'étuve.



Figure III.11: Essai de foisonnement

#### Mode opératoire

- 1-Préparer dans une bassine la masse initiale du sable  $M_1 = 2000$  g pour  $w = 0$  %.
- 2- Remplir sans tasser un récipient de 1 l en se servant des mains comme entonnoir et araser à l'aide de la règle.
- 3-Peser le tout et noter  $m_0$  la masse du sable contenue dans le récipient.
- 4-Déterminer la masse volumique apparente du sable sec  $\rho_0 = \rho_t = m_0/v$ .
- 5-Reverser le sable contenu dans le récipient de 1 l dans la bassine.
- 6-Ajouter 1% d'eau, soit 20 g d'eau, aux 2000 g du sable sec.
- 7-Mélanger l'ensemble avec la spatule.
- 8-Remplir sans tasser le récipient de 1 l en se servant des mains comme entonnoir et araser à l'aide de la règle.



9-Peser le tout et noter  $m_1$  la masse du sable contenue dans le récipient.

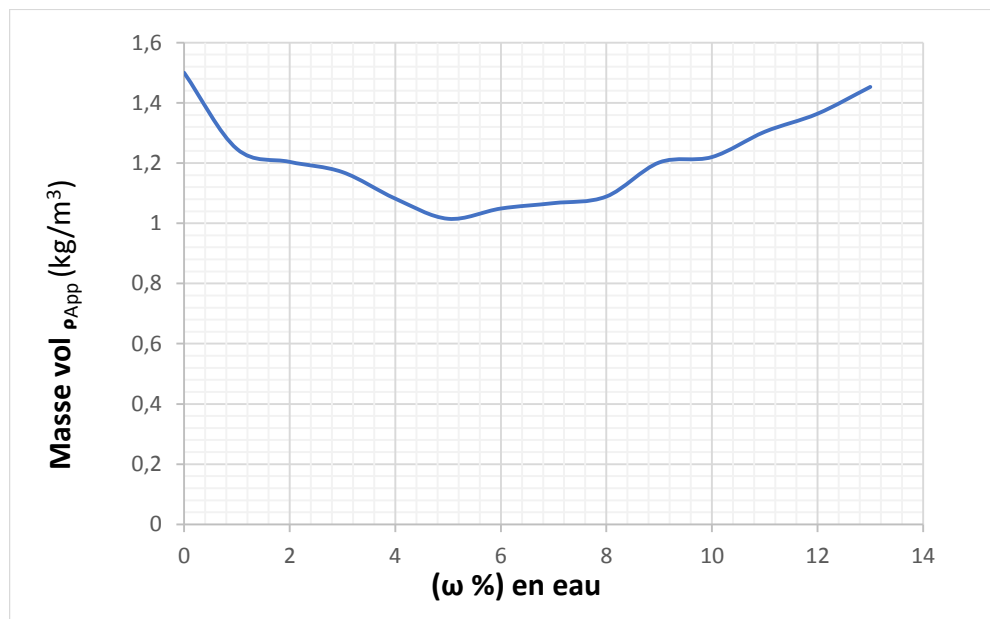
10-Déterminer la masse volumique du sable  $\rho_1 = m_1/v$  pour  $w = 1\%$  .

11-Recommencer à nouveau à partir de l'étape 6 en faisant varier la teneur en eau de 1% entre 0 et 10%, et de 2% entre 10 et 20%.

**Tableau III.7:** L'essai de foisonnement du sable et teneur en eau.

<b>Teneur en eau (<math>\omega</math> %)</b>	0	1	2	3	4	5	6
<b>Masse vol <math>\rho_{App}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,500</b>	<b>1,247</b>	<b>1,204</b>	<b>1,170</b>	<b>1,082</b>	<b>1,015</b>	<b>1,049</b>

<b>Teneur en eau (<math>\omega</math> %)</b>	7	8	9	10	11	12	13
<b>Masse vol <math>\rho_{App}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,067</b>	<b>1,089</b>	<b>1,202</b>	<b>1,220</b>	<b>1,304</b>	<b>1,364</b>	<b>1,453</b>



**Figure III.12:** Courbe de foisonnement du sable et teneur en eau.

- Résumé Des Résultats

**Tableau III.8 :** Résumé des résultats des essais sur le sable.

Caractéristiques physique	Sable
Masse Volumique apparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1500
Masse Volumique absolue (Méthode de l'éprouvette graduée.) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2500
Masse Volumique absolue (Méthode du ballon) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2600
Equivalent du sable (%) piston	61.41
Equivalent du sable (%) Visuel	65
Module de finesse	2.23
Pourcentage des fines (%)	13.80
Teneur en eau	5%
Coefficient d'absorption(%)	2.10

### III.2.2 . Ciment et les ajouts

#### ❖ Ciment

Pour cette étude nous avons utilisé un ciment portland composé CEM II/A 42.5 correspondant à la norme [NA 442/2000] provenant de la cimenterie de BENI-SAF (Ain-Temouchent), il est constitué de 85% du clinker et 12 % de pouzzolane naturelle d'origine volcanique, elle est aussi riche en silice et en alumine dont la grande partie est amorphe, la composition chimique du ciment est présentée dans le tableau suivant :

**Tableau III.9 :** Composition chimique du ciment (en %).

ELEMENT	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO LIBRE	Perte au feu
TENEUR	27.97	5.43	3.05	56.37	0.71	2.53	0.75	3.11

### III.2.2.1 . Les Masses Volumiques (Absolues et Apparentes)

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme **EN 196-1**, Nous avons utilisé la méthode de mesure au pycnomètre pour le calcul de la masse volumique absolue. Les résultats sont présentés sur le **Tableau III.12**.

### III.2.2.2 . Détermination la consistance normalisée et du temps de prise

#### III.2.2.2 .1. Détermination de la consistance normalisée

La consistance de la pâte du ciment est une caractéristique qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différentes paramètres il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée », et aussi de déterminer, pour le ciment CEM II/A 42.5 que nous avons utilisé, la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 196-3**.

#### Appareillage :

- Malaxeur
- Balance
- Moule
- Sonde
- Aiguille
- Bain
- Appareille de Vicat.



Figure III.13 : L'essai de consistance

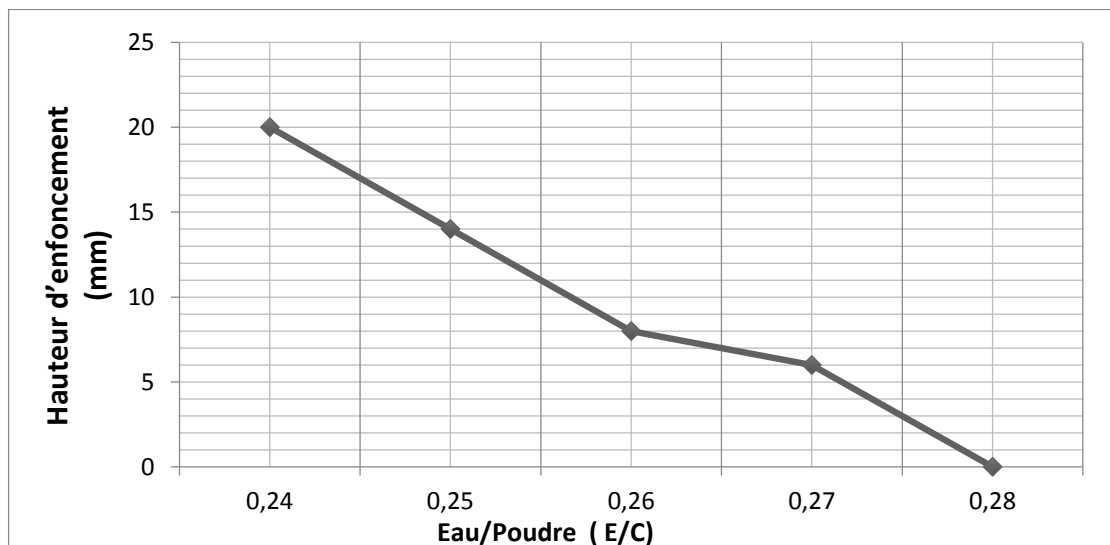
#### Mode Opérateur :

1. Peser au moyen d'une balance 500 g de ciment.
2. peser une quantité d'eau de 125 g.
3. mettre en marche le malaxeur à petite vitesse, et introduire l'eau et le ciment en dix (10) secondes au maximum et en évitant toute perte d'eau ou de ciment et noter le temps de démarrage.
4. Arrêter le malaxeur après 90 s, pendant 30s, et enlever la pâte du ciment adhérant aux parois et au fond et la placer au milieu du bol.

5. Remettre le malaxeur en marche à petite vitesse pendant 90 s.
6. Verser immédiatement dans le moule placé sur la plaque de base, éliminer les vides dans la pâte en tapotant doucement le moule et enlever l'excès de pâte par un léger mouvement de scie de manière avoir une surface supérieure lisse .
7. Abaisser doucement la sonde jusqu'à ce qu'elle soit en contact avec la pâte, après une pause de 1 à 2 secondes, lâcher rapidement les parties mobiles et laisser la sonde pénétrer verticalement au centre de la pâte .
8. Enregistrer la valeur lue sur l'échelle qui indique la distance entre la face inférieure de la sonde et la plaque de base.
9. Refaire l'essai avec des pâtes contenant des quantités d'eau différents, jusqu'à ce que l'une d'elle produise une distance de (6+/-) mm entre la sonde et la plaque de base, enregistrer la teneur en eau de cette pâte comme consistance de la pâte du ciment.

**Tableau III.10 :** La hauteur de l'enfoncement.

	Eau/Poudre	Masse d'eau(Me) (g)	Hauteur d'enfoncement (mm)
<b>Ciment</b>	0,24	120,00	20
	0,25	125,00	14
	0,26	130,00	8
	0,27	135,00	6
	0,28	140,00	0



**Figure III.14:** Évolution de l'enfoncement de la sonde en fonction du dosage.

La compacité C de la poudre est alors déterminée par la formule suivante :

$$C = \frac{1000}{1000 + M_V \frac{M_e}{M_p}} \quad ; \quad C = \frac{1000}{1000 + 3100 \frac{0.135}{0.500}}$$

**Tableau III.11** : Résultats de l'essai de consistance normalisée.

Compacité C	Consistance %
<b>0.54</b>	<b>27%</b>

### III.2.2.2 .2. Détermination du temps de début et de fin de prise

Le début de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture du ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et des dosages en adjuvant.

L'objectif de l'essai est de définir pour un ciment donné un temps qui soit significatif de cette rapidité de prise.

Nous avons réalisé l'essai de l'aiguille Vicat à l'aide de la méthode expérimentale normalisée (NF EN 196-3) qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise.

#### Principe de l'essai :

Il consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment en mesurant la profondeur d'enfoncement de l'aiguille de l'appareil dans la pâte.

#### Appareillage :

- Un appareil de Vicat, équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre
- Un moule tronconique
- Un chronomètre
- Une balance

#### Mode opératoire :

1. Retirer la sonde et la remplacer par l'aiguille
2. Régler l'appareil de Vicat équipé de l'aiguille fixée en abaissant l'aiguille jusqu'au Contact avec la plaque de base

3. Remplir un moule tronconique de pâte de consistance normalisée, malaxée suivant la partie 1 (noter l'heure du malaxage).
4. Placer le moule rempli et la plaque de base dans le bain d'eau de température de  $(20 \pm 1)$  C°
5. Après un temps approprié, placer le moule et la plaque de base sous l'aiguillé de l'appareil de Vicat, et abaisser jusqu'à ce qu'elle soit en contact avec la pâte.
6. Après une pause de 1 à 2 S, lâcher rapidement les parties mobiles et laisser l'aiguillé pénétrer verticalement dans la pâte
7. Enregistrer la valeur lue sur l'échelle qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguillé et la plaque de base.
8. Refaire la même opération à intervalle de temps, jusqu'à avoir la valeur lue de  $(6 \pm 3)$  mm
9. Noter le temps de début de prise du ciment, le temps d'écoulé zéro (heure de malaxage), et le temps auquel la distance lue est de  $(6 \pm 3)$  mm.
10. Retourner le moule rempli, utilisé ci-dessus sur sa plaque de base, et l'immerger dans le bain d'eau à température de  $(20 \pm 1)$  C°
11. Après un temps approprié, refaire l'essai de pénétration comme en partie 1, et enregistrer la valeur lue.
12. Recommencer l'opération de pénétration sur la même éprouvette jusqu'à ce que l'aiguillé ne pénètre que de 0,5 mm. Noter ce temps qui correspond au temps de fin de prise
13. Confirmer ce temps par deux pénétrations à de points différentes de l'éprouvette.



**Figure III.15 :** L'essai de début et fin de prise.

Tableau III.12 : Début et fin de prise.

Début de prise (min)	180
Fin de prise (min)	300

### III.2.2.3 . La surface spécifique de Blaine SSB NF P 15-471

La surface spécifique d'un liant est calculée en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et la température connue, à traverser une couche tassée de liant.



Figure III.16 : Perméabilimètre de Blaine.

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement broyée. Cette finesse est une caractéristique importante, lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique, c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en  $\text{cm}^2$  de surface des grains de ciment par gramme de poudre, l'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

#### Principe de l'essai :

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre. La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs,

plus la surface massique de cette poudre est long. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à racine  $t$ .

#### Equipement nécessaire :

- Un appareil appelé Perméabilimètre de Blaine.
- Une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester.
- Un manomètre constitué d'un tube en verre de forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère.
- La cellule est équipée d'une grille dans sa partie inférieure.
- Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume  $V$  défini.
- Une balance précise à 0.2 s après.
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule.
- Du mercure pour mesurer le volume  $V$  de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0.1 °C près pour mesurer température de l'air.

#### Conduite de l'essai selon la norme NF EN 196- 6

Afin de déterminer la SSB la masse spécifique doit être déterminée au préalable.

Calculer la masse à peser ( $m$ ) du ciment:

Avec:

$$m = \rho (1-e) v$$

$\rho$ : étant la masse spécifique préalablement déterminée.

$V$  : étant le volume cellulaire.

$e$  : étant la porosité du ciment ( $e= 0,5$ ).

- Etuver l'échantillon à une température comprise entre 80 et 100°C, puis le refroidir dans un dessiccateur jusqu'à la température ambiante.
- Agiter l'échantillon dans un pilulier fermé pour l'homogénéisation de ce dernier.
- Préparer la cellule en disposant le disque métallique perforé sur l'épaulement de cette dernière.
- Placer un deuxième disque de papier filtre sur le ciment.
- Insérer le piston plongeur jusqu'au contact avec le papier filtre, le presser jusqu'à ce que la face intérieure de son épaulement soit en contact avec la cellule.



- Retirer le piston lentement.
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet de manomètre après l'avoir préalablement graissé.
- En ouvrant le robinet d'arrêt et de la poire, aspirer le liquide manométrique jusqu'au repère supérieure, fermer le robinet d'arrêt.
- Chronométrer le temps nécessaire au liquide pour passer du deuxième au troisième repère.
- Enregistrer deux temps pour le même lit.
- Répéter un deuxième essai pour le même échantillon.

La SSB est calculée par la formule suivante :

$$SSB = K \frac{\sqrt{e^3 T}}{P(1-e) \cdot \sqrt{\mu}}$$

Avec :

**K** : est la constante de l'appareil  $K = 28.97$

**e** : est la porosité de la couche tassée  $e = 0,5$  (en moyenne).

**P** : est la masse volumique absolue du ciment.

**T** : est le temps en secondes.

**$\mu$**  : est la viscosité de l'air.  $\mu = 0,0001798$ .

La surface Blaine des ciments varie de 3100 à 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

$M_0 = 100.5\text{g}$ ,  $M_1 = 314.5\text{g}$ ,  $t = 864\text{g/ml}$ ,  $M_2 = 60\text{g}$ .

**$M_0$** : masse de la cellule vide.

**$M_1$**  : masse de cellule plus la masse de mercure.

**$\rho_t$**  : masse volumique de mercure.

**$M_2$** : masse du ciment.

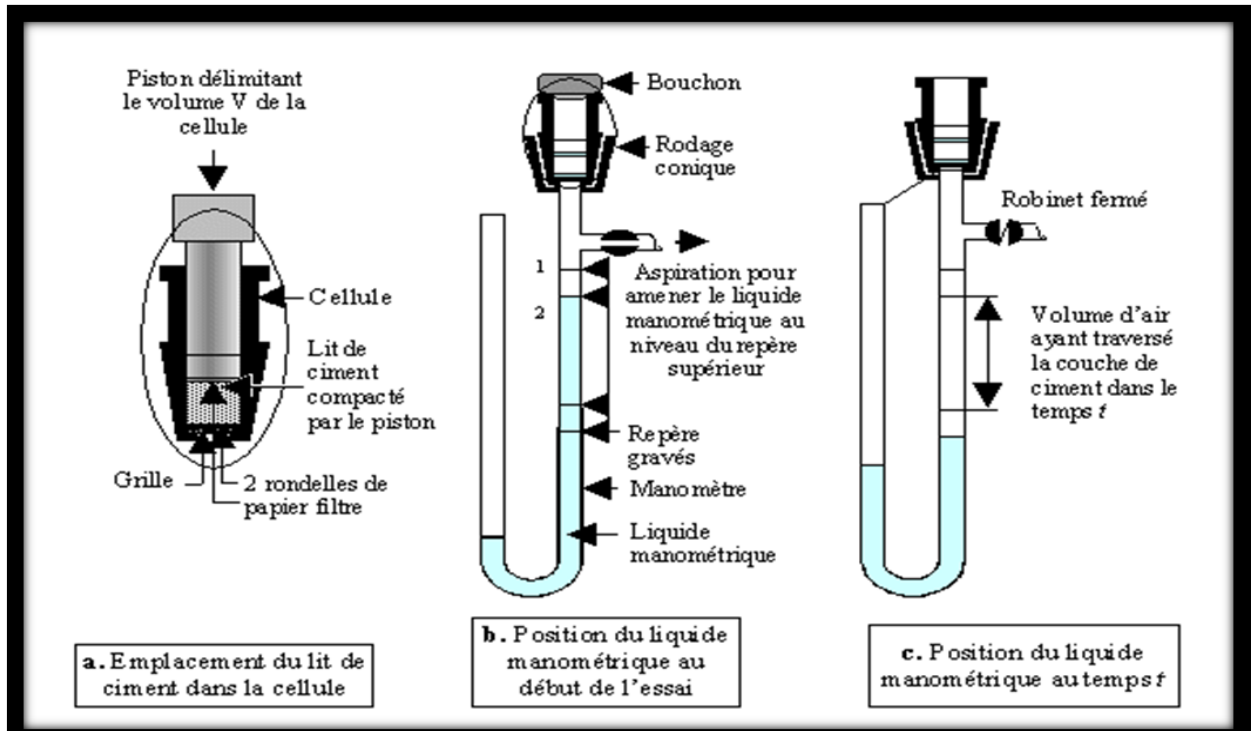


Figure III.17: La surface spécifique de Blaine.

❖ REMARQUE

Les mêmes essais sont réalisés pour les ajouts (Fillers Calcaires et Poudre de Brique), les résultats de celles-ci sont résumés sur le **Tableau III.13**.

➤ **Résumé des Résultats :**

**Tableau III.13 :** Les caractéristiques du ciment et des ajouts.

Composition	Ciment CEM II/A 42.5	Fillers calcaires	Poudre de brique
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3085.60	3897.60	4276.82
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	3100	2500	2510
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	993	1074	689
Début de prise (min)	180	-	-
Fin de prise (min)	300	-	-
Consistance (%)	27	-	-

**III.2.3 . Retrait des mortiers**

L’essai consiste à mesurer les variations de longueur de fissurations observées sur des mortiers et leurs conséquences pratique selon la norme **NF P 15-433 (NT 47.13)**.

**Mode opératoire :**

- Préparer un mortier normalisé : (C = 450, S = 1350, E/C = 0,5)
- Couler le mortier dans le moule spécifique pour l’essai de fissuration.
- Placer dans le moule dans une étuve à 50°C.
- Mesurer la longueur de fissuration à 30min, 60min, 90 min et 120 min



**Figure III.18 :** Moule pour essai de fissuration pour mortier.

- **Essai 01 :** C= 450g , S=1350 g,  $\frac{E}{C} = 0.5$  , E=225 ml

**Tableau III.14 :** Les résultats d’essai1 E/C=0.5.

Temps (s)	Les fissures (cm)					
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	
<b>30</b>	2.3	6	-	-	-	$\sum$ 8.3
<b>60</b>	7	11.5	5	2.5	-	$\sum$ 26
<b>90</b>	19.5	17	4	-	-	$\sum$ 40.5
<b>120</b>	19.5	18	14	9	13	$\sum$ 73.5

- **Essai 02 :** C= 650g , S=1350 g,  $\frac{E}{C} = 0.5$  , E=325 ml

Tableau III.15 : Les résultats d'essai 2 E/C=0.5.

Temps (s)	Les fissures (cm)								
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	
30	18	7	3	6	19	7	-	-	$\sum 60$
60	19	8.5	4	12	19.5	16	7	-	$\sum 86$
90	19.5	10	5	19	15	11	10.5	12	$\sum 102$
120	19.5	17	19	19	8	7	18.5	14	$\sum 122$

- Essai 03 : C= 450g , S=1350 g,  $\frac{E}{C} = 0.7$  , E=315 ml

Tableau III.16 : Les résultats d'essai 1 E/C=0.7.

Temps (s)	Les fissures (cm)						
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	
30	17	10	2	-	-	-	$\sum 29$
60	18	15	7	3.5	-	-	$\sum 34.5$
90	18.5	17	2	18.5	4	-	$\sum 50$
120	19	15	8.5	18.5	12	14	$\sum 87$

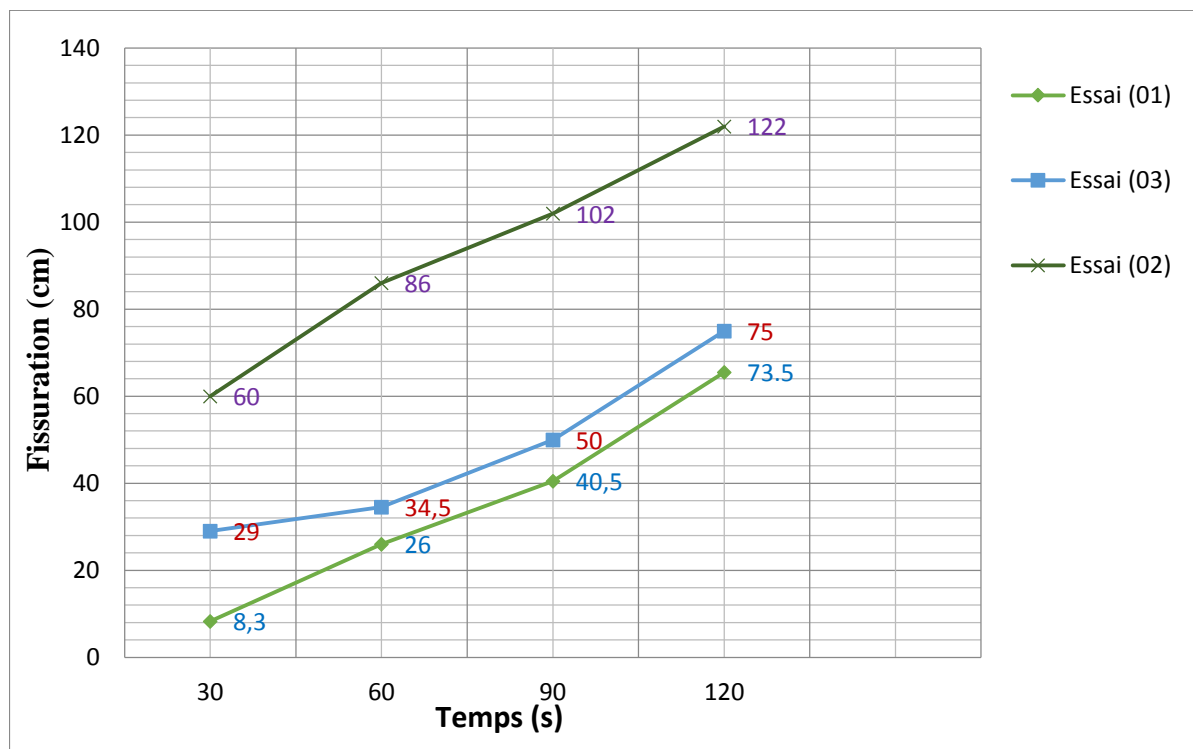


Figure III.19: La variation de la fissuration en fonction de temps.

### III.2.4. Eau de Gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de matériaux de génie civil de la Faculté de technologie l'Université de Tlemcen au niveau de Chetouane

### III.3 . Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une caractérisation des matériaux utilisés du point de vue physique et mécanique, les résultats des essais sont conforme et aux prescriptions des normes en vigueur.

## **Chapitre IV.**

---

# **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

---

---

## IV.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons étudier l'effet des ajoutes minéraux (fillers calcaires et poudre de brique) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité des mortiers vis à vis les attaques acides telle que l'acide chlorhydrique HCL et la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Ces mortiers sont immergés dans deux milieux agressifs pour une durée d'une 28jours à savoir l'acide chlorhydrique et la chaux. Des essais de perte de masse et la résistance à la compression sont faits selon les normes.

## IV.2. Formulation des mortiers

L'étude s'appuie sur l'évaluation et la qualification de la durabilité des mortiers à base des additions minérales vis-à-vis les milieux agressifs, l'attaque à l'acide chlorhydrique (HCl) est réalisée par un essai selon la norme ASTM C 267-96 (ASTM C 267-12, 01).

Les échantillons des mortiers normaux sont confectionnés, selon la norme (NFP 15-403), avec une substitution d'une partie du ciment par (5%, 10% et 15%) de Fillers Calcaires et poudre de brique. Le ciment utilisé est le ciment Portland CEM II/ 42.5 de Béni Sal (Algérie), sable de granulométrie de carrière de Tagema (Algérie). Le taux de l'eau de gâchage a été maintenu constant pour l'ensemble des gâchées :  $E/C=0.5$ .

**N.B** :L'eau de gâchage utilise l'eau de robinet de Chetouane (Tlemcen).

Pour la caractérisation de la résistance chimique résistance chimique vis-à-vis l'attaque d'acide chlorhydrique et mécanique, des éprouvettes de mortier Prismatiques  $(40 \times 40 \times 160) \text{mm}^3$  ont été confectionnés selon la norme (NF EN196.1). Après démoulage à 24 heures.

### IV.3. Composition des mortiers

les formulations des mortiers sont reportées dans les tableaux IV.1:

**Tableau IV.1:** Les différentes compositions des mortiers.

Constituant Mortier	Fillers Calcaires		Poudre De brique		CEMII	Sables	E/C
	%	(g)	%	(g)	(g)	(g)	/
<b>0%</b>	/	/	/	/	450	1350	0.5
<b>5% FC</b>	5	22.5	/	/	427.5	1350	0.5
<b>10% FC</b>	10	45.0	/	/	405.0	1350	0.5
<b>15% FC</b>	15	67.5	/	/	382.5	1350	0.5
<b>5%PB</b>	/	/	5	22.5	427.5	1350	0.5
<b>10% PB</b>	/	/	10	45.0	405.0	1350	0.5
<b>15% PB</b>	/	/	15	67.5	382.5	1350	0.5

AVEC :

**0%** : Mortier normalisé CEMII.

**5% FC** : Mortiers qui ont 5% de Fillers Calcaires substitué au ciment.

**10% FC** : Mortiers qui ont 10% de Fillers Calcaires substitué au ciment

**15% FC** : Mortiers qui ont 15% de Fillers Calcaires substitué au ciment.

**5% PB** : Mortiers qui ont 5% Poudre de Brique substitué au ciment.

**10% PB** : Mortiers qui ont 10% Poudre de Brique substitué au ciment.

**15% PB** : Mortiers qui ont 15% Poudre de Brique substitué au ciment.

### IV.4. Préparation des solutions

On commence par calculer les volumes des solutions agressifs (HCL et Ca(OH)<sub>2</sub>) nécessaires à la préparation des Solutions de 5L et 14 L d'environ à 5% pour chaque solution.

- **Solution d'acide HCl 5% :**

$$\frac{m_{(acide)}}{m_{(acide)} + m_{(eau)}} = 0.05$$

$$m_{(acide)} = \frac{0.05}{0.95} m_{(eau)}$$

$$v_{(eau)} = 5 \text{ l.}$$



Densité d'eau=1

$$m_{(eau)} = v_{(eau)} * \text{Densité d'eau} = 5 * 1 = 5 \text{ kg} = 5000 \text{ g}$$

$$m_{(acide)} = \frac{0.05}{0.95} * 5000 = 263,158 \text{ g}$$

**HCL ==> 37 %**

$$37 \text{ g} \longrightarrow 100 \text{ g}$$

$$263.158 \text{ g} \longrightarrow X?$$

$$X? = 711.238 \text{ g}$$

$$\rho_{(acide)} = \frac{m_{(acide)}}{v_{(acide)}} \longrightarrow v_{(acide)} = \frac{m_{(acide)}}{\rho_{(acide)}}$$

$$\rho_{(acideHCL)} = 1.184 \text{ g/cm}^3$$

$$v_{(acide)} = \frac{711.238}{1.184} = 600.71 \text{ ml}$$

**Alors solution final :**

$$v_{(finale)} = v_{(eau)} + v_{(acide)}$$

$$v_{(finale)} = 5000 + 600.71$$

$$v_{(finale)} = \mathbf{5600.71 \text{ ml}}$$

- **Solution basique Ca(OH)<sub>2</sub>5%**

$$1\text{L} \rightarrow 2\text{g.}$$

$$14\text{L} \rightarrow Y? \quad \text{Donc : } Y = 48\text{g}$$

$$M_{(Ca(OH)_2)} = \mathbf{48\text{g}}$$

#### IV.5. Procédure expérimentale

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes prismatiques de mortier (160x40x40 mm<sup>3</sup>) ont été confectionnées puis démoulées après 24 heures ( figure II.1).

Après le démoulage , les éprouvettes sont pesées pour déterminer **M1** puis elles sont immergées dans les différentes solutions qui sont évaluées selon la (**norme ASTM C 267-12**) 5% d'acide chlorhydrique (HCl) acide fort et 5% hydroxyde de chaux (Ca(OH)<sub>2</sub>) solution basique. pour des périodes de 2, 7, 14, 21 et 28 jours. Le reste des mortiers sont immergées dans l'eau potable pour eux aussi pour des périodes de 2, 7, 14, 21 et 28 jours.

Le jour de chaque essai, les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau puis on les laisse sécher et après une demi-heure, on évalue :

- La résistance à l'attaque chimique selon la variation de masse (PM) donnée par la formule (VI.1) :

$$PM (\%) = [(M1-M2/M1)] \times 100 \text{ (VI.1)}$$

Avec M1, M2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement

- Les résistances mécaniques à la compression.

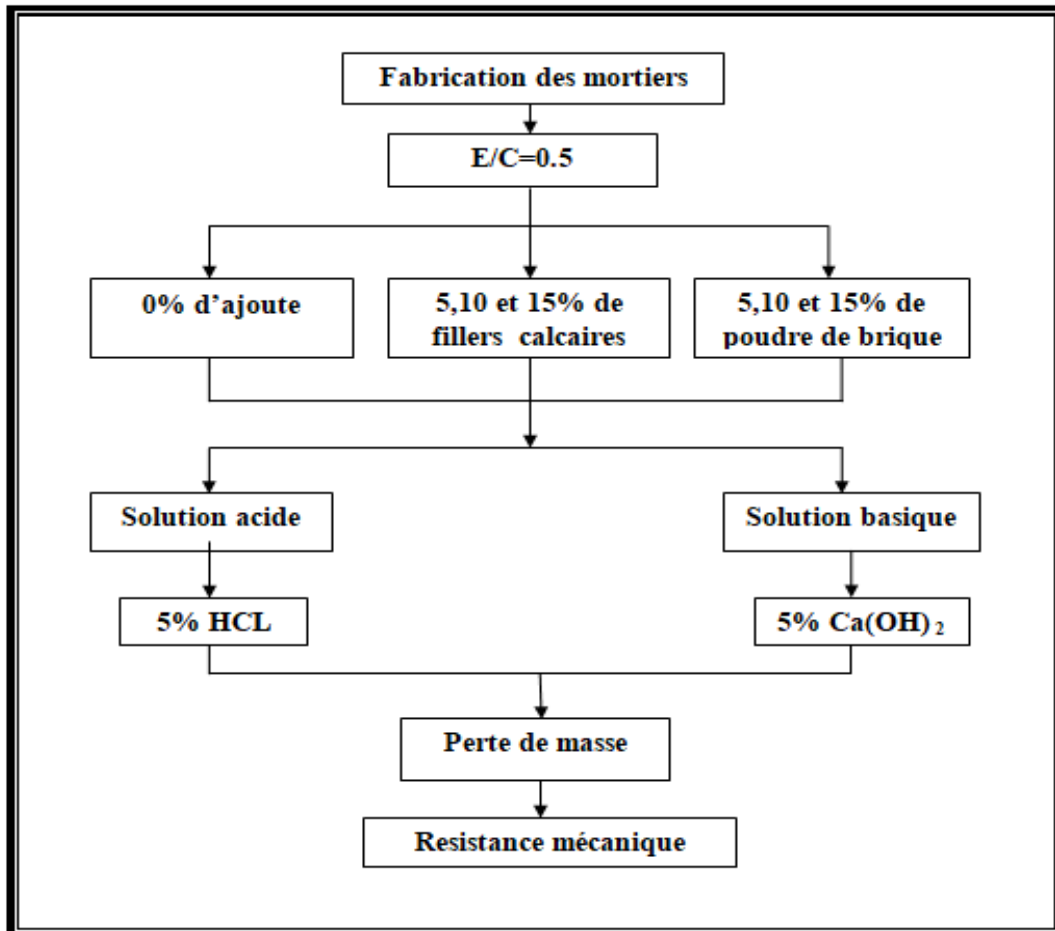


Figure IV.1 : Organigramme résumant le travail expérimental.

## IV.6. Résultats et discussions

### IV.6.1. Perte de masse

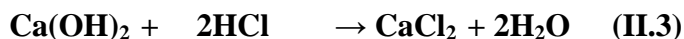
#### IV.6.1.1 . Perte de masse en solution acide (HCl)

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (5% en masse).

L'agressivité de l'attaque d'acide chlorhydrique est provoquée par leur réaction avec une

partie d'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment, qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble et facilement enlevé de la pâte affaiblissant de ce fait la structure de l'ensemble du mortier.

La réaction de base est illustrée par la formule II.3 (voir chapitre II).



**Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau**

L'effet de l'attaque HCl sur les différents mortiers d'étude est quantifié en déterminant les pertes en masse des échantillons en contact avec cet acide.

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des mortiers immergées dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl à 5 % de concentration est présenté sur le tableau IV.2 suivant.

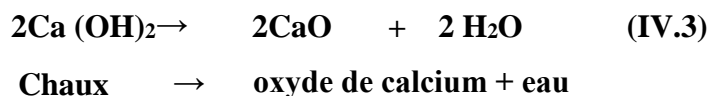
**Tableau IV.2 :** Perte de masse des mortiers immergées dans HCl.

Mortiers	PM (%) ( $\Delta = \pm 0,1$ )					
	1jour	2jours	7jours	14jours	21jours	28jours
<b>0%</b>	2,26	2,16	2,08	1,90	1,72	1,49
<b>5% FC</b>	4,34	4,50	4,91	5,23	5,48	5,69
<b>10% FC</b>	3,29	3,60	3,82	4,20	4,95	5,16
<b>15% FC</b>	3,76	4,11	4,63	4,82	4,99	5,20
<b>5% PB</b>	1,32	1,32	1,25	1,10	0,94	0,78
<b>10% PB</b>	1,52	1,44	1,28	1,08	0,88	0,69
<b>15% PB</b>	1,15	1,03	0,96	0,75	0,48	0,24

#### IV.6.1.2 .Perte de masse en solution basique $\text{Ca(OH)}_2$

L'essai de la résistance aux attaques basique, consiste à suivre l'évolution de la masse d'échantillons immergés dans une solution saturée en basique (5% en masse).

La réaction de base est illustrée par la formule IV.3 :

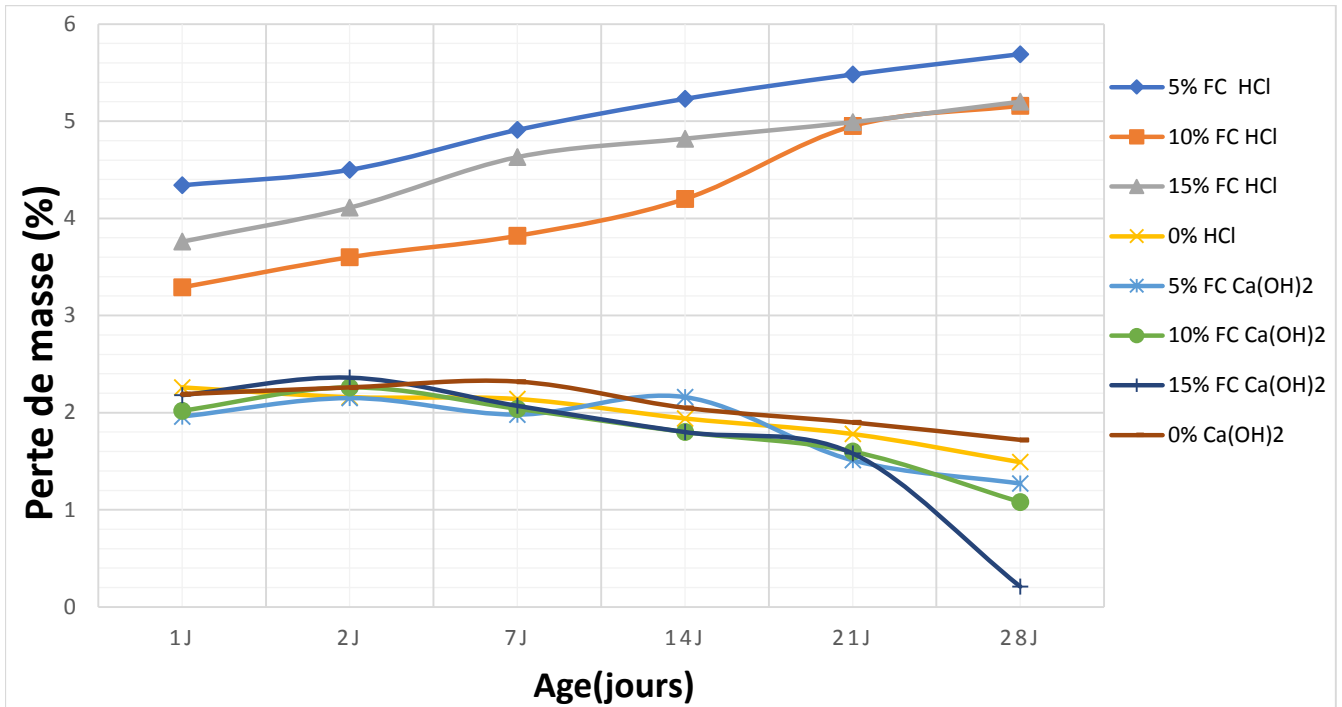


**Tableau IV.3** : Perte de masse des mortiers immergées dans  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Mortiers	PM (%)					
	1jour	2jours	7jours	14jours	21jours	28jours
<b>0%</b>	2,19	2,26	2,32	2,05	1,90	1,72
<b>5% FC</b>	1,96	2,15	1,98	2,16	1,51	1,27
<b>10% FC</b>	2,02	2,26	2,04	1,80	1,60	1,08
<b>15% FC</b>	2,18	2,36	2,07	1,80	1,58	0,21
<b>5% PB</b>	1,90	1,99	2,00	1,62	1,26	1,12
<b>10% PB</b>	2,06	2,17	2,18	2,02	1,90	1,78
<b>15% PB</b>	1,93	2,01	2,05	1,89	1,59	1,40

#### IV.6.1.3 . Interprétation des résultats

La figure IV.2 montre l'évolution de la perte de masse des mortiers (0%, 5% ,10% , 15%) à base de Fillers Calcaires en fonction de la période d'immersion dans deux solution à de 5 % de HCl et 5% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$



**Figure IV.2 :** Variation de la perte en poids des mortiers à base de fillers calcaires en fonction de la période d'immersion en 5% HCl et 5% Ca(OH)<sub>2</sub>.

En analysant l'évolution des courbes de la perte en poids des trois mortiers, nous pouvons constater une perte en masse permanente concernant les mortiers immergés dans la solution d'acide chlorhydrique à 5% de concentration et dans la solution basique à 5% de concentration. Après 24 heures et jusqu'au l'âge de 28 jours.

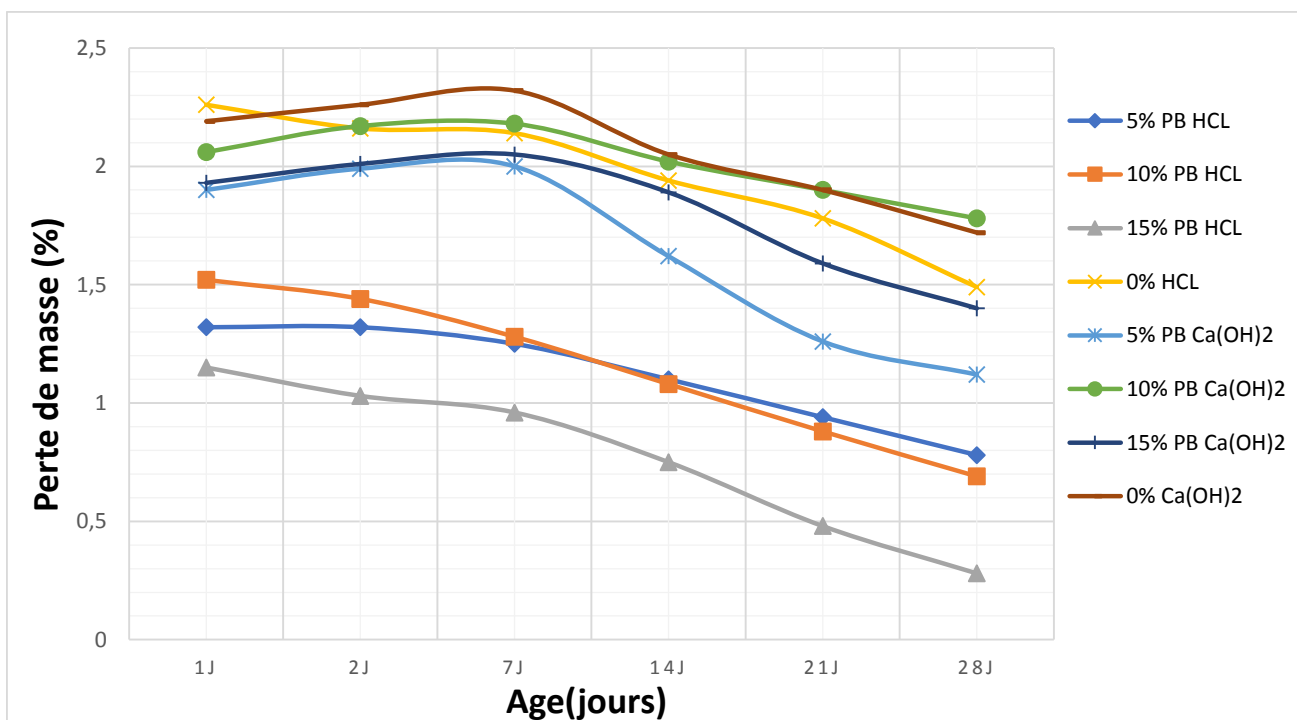
On remarque que le mortier de 5% FC c'est lui qui subit la plus grande dégradation par rapport aux autres mortiers, il perd 4.5 % de son poids après 02 jours d'immersion en HCl par contre pour la même période (02j) la perte de poids diminue de 2.15% dans la solution basique (Ca(OH)<sub>2</sub>).

On constate aussi que le mortier 10% FC résiste mieux dans la solution d'HCl par rapport aux mortiers 5% FC et 15 % FC dans les deux premières semaines. A partir de la troisième semaine le mortier à 10% FC et celui à 15% FC résistent mieux à l'attaque d'acide chlorhydrique par rapport au mortier à 5% FC en effet, ils perdent respectivement presque la même masse à partir de 21jours jusqu'à 28jours 4.95 % et 4.99 % à 21jours, 5.16 % et 5.20 % de leurs poids à 28jours.

Les pertes de masse des mortiers à 5% FC, 10% FC et 15% FC immergés dans la solution rapprochent en général et ceci sur la période allant jusqu'au 21<sup>ème</sup> jour.

La perte de masse des éprouvettes dans les solutions augment en général durant la période allant de 2 jours à 7 jours, cette augmentation est plus prononcée pour les mortiers à base de fillers calcaires dans la solution d'HCl. Toutefois après la durée de 21 jours on constate une hausse en perte de masse des mortiers 5% FC ,10% FC et FC dans la solution d'HCl par contre on enregistre une diminution de perte de masse des mêmes mortiers en solution basique.

La Figure IV.3, montre que les mortiers à 5% PB et 10% PB perdent presque le même poids en général sur toute la période d'essai. Par ailleurs on constat que le mortier à 15 % PB dans la solution d'HCl c'est lui qui résiste le mieux par rapport aux autre mortier et ceci pour les deux solutions considérées.



**Figure IV.3 :** Variation de la perte en poids des mortiers à base de poudre de brique en fonction de la période d'immersion dans 5 % de HCl et Ca(OH)<sub>2</sub>.

A l'âge de 14 jours, la perte de masse augmente pour tous les types de mortiers mais avec des vitesses différentes.

La résistance des mortiers avec Poudre de Brique et mortier sans ajoutes plus grande que celles avec Fillers calcaires qui sont développées dans l'acide HCl.

#### IV.6.2. Résistances Mécaniques

Des éprouvettes 4x4x16 cm de mortier à base de fillers calcaires et de poudre de brique (0, 5, 10 et 15%) ont été testées à la compression à 2 et 28 jours.

**Tableau IV.4:** les résistances des mortiers contenant les fillers calcaires immergées dans HCl et  $\text{Ca(OH)}_2$

Mortier		Résistance à compression	
solution	Pourcentage de filler calcaire	2 jours	28 jours
HCL	5%	13,62	20.62
	10%	15.06	27.75
	15%	13.49	25.18
	0%	11.57	24.70
Ca(OH) <sub>2</sub>	5%	10.60	31.26
	10%	15.43	34.50
	15%	13.43	21.85
	0%	13.53	35.22

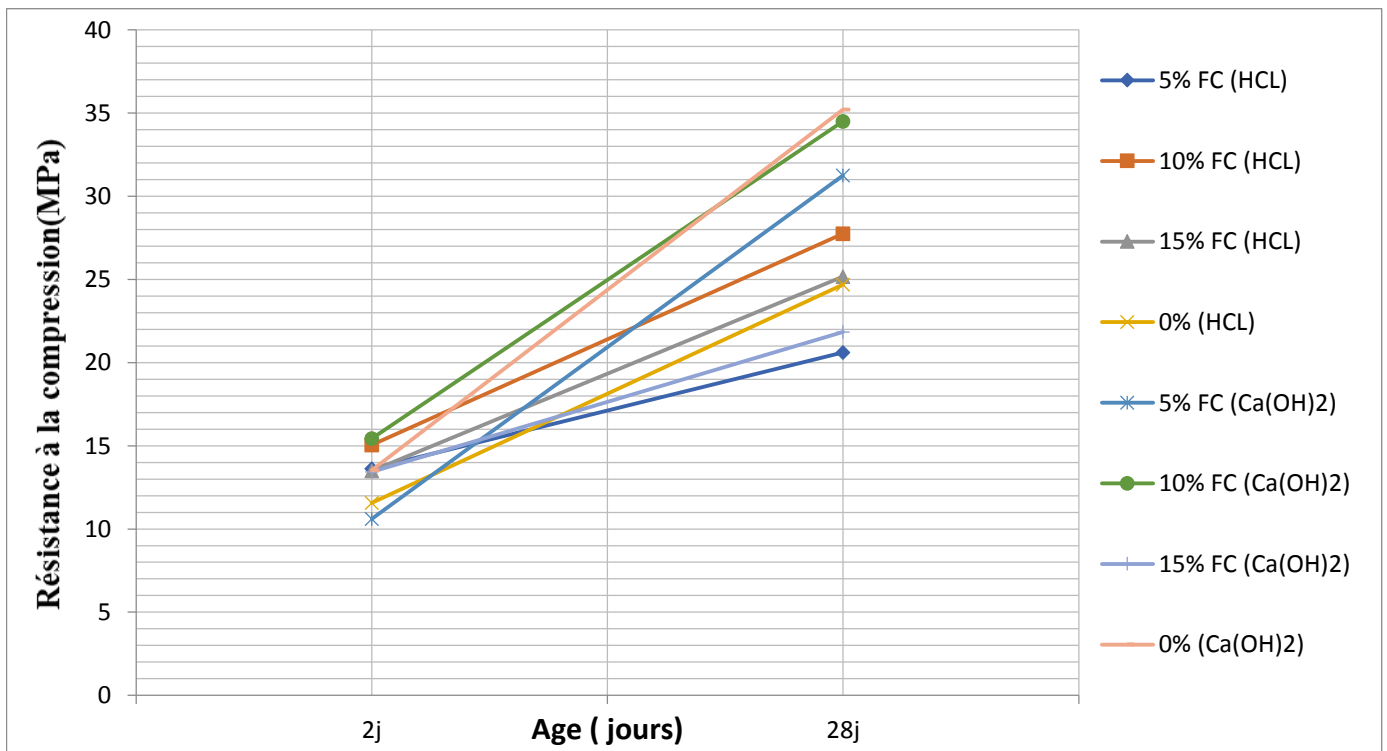
**Tableau VI.5:** Les résistances des mortiers contenant de la poudre de brique dans HCl et  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Mortier		Résistance à compression	
solution	Pourcentage de poudre de brique	2 jours	28 jours
HCL	5%	18.81	25.65
	10%	16.87	25.13
	15%	8.01	25.25
	0%	11.57	24.7
Ca(OH) <sub>2</sub>	5%	15.43	35.7
	10%	16.00	36.65
	15%	14.36	33.47
	0%	13.53	35.22

#### IV.6.2.1 . Interprétation des résultats

La figure IV.4 montre l'évaluation de la résistance à la compression des mortiers à 2 jours et 28 jours. D'après cette figure on remarque que les résistances à la compression évoluent progressivement dans le temps et ceci pour les deux solutions considérées, sauf que cette évaluation est plus rapide pour les mortiers immergés dans la solution basique  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Par ailleurs, cette figure montre que les mortiers à 10% de fillers calcaires présentent en général les meilleures résistances à la compression à 2 jours à 28 jours et ceci pour les deux solutions (acide et basique) considérées.

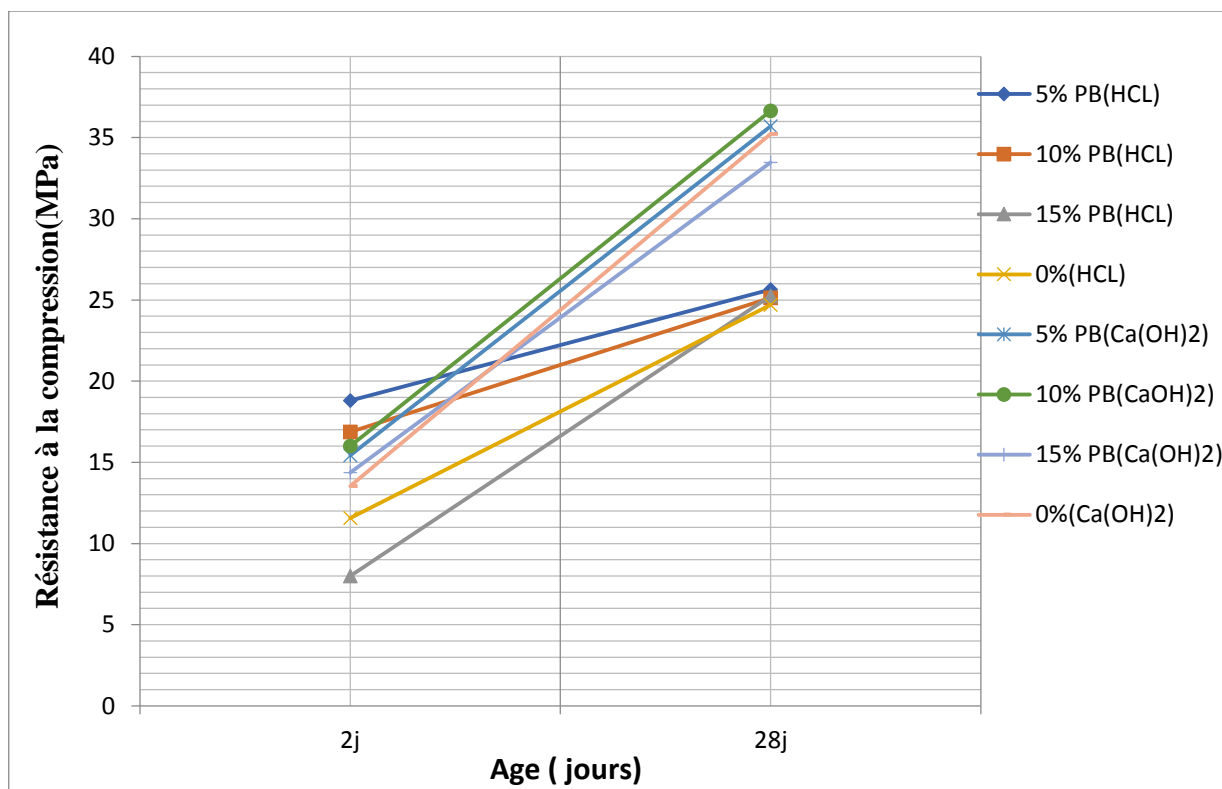


**Figure IV.4:** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant les fillers calcaires immergés en HCl et  $\text{Ca(OH)}_2$

La figure IV.5 montre l'évaluation à la résistance à la compression des mortiers à base de poudre de brique à 2 jours à 28 jours. L'évaluation de cette figure est similaire à celle de la figure IV.4 Et montre que la résistance à la compression augmentent dans le temps pour les deux solutions envisagés et cette augmentation est plus rapide pour les mortier immergés dans la solution  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Aussi, cette figure montre en général que les mortiers à 10% de poudre de brique présentent les meilleurs résistances à la compression à 2 jours et 28 jours et ceci pour les deux solutions considérées.





**Figure IV.5:** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant la poudre de brique immergées en HCl et Ca(OH)<sub>2</sub>

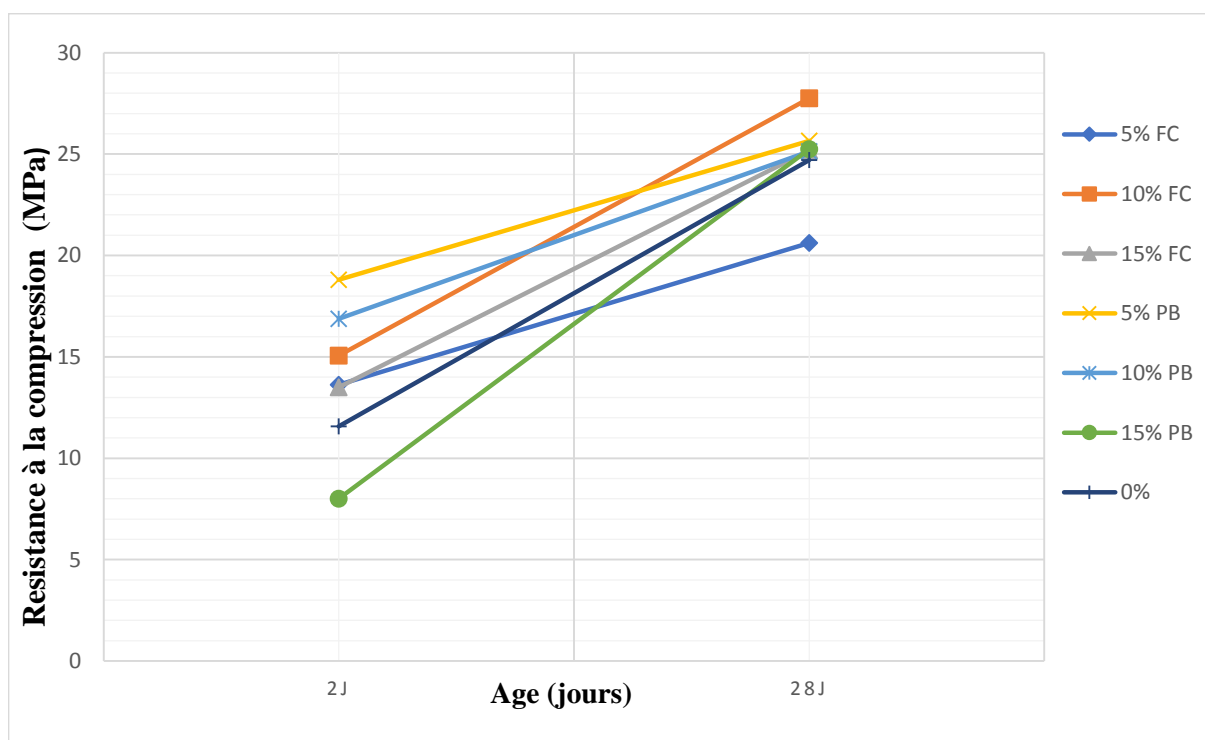
Les résultats de la résistance à la compression montrent une influence positive des ajouts minéraux sur la résistance à l'attaque acide. Cela est dû principalement à la faible diffusivité de ces mortiers et à la réduction de la teneur en portlandite (CH)

- **Etude comparative entre les mortiers dans la solution HCl**

D'après les résultats obtenus (tableau IV.6) et (figure IV.6) on remarque que le mortier à 10%FC présente la résistance à la compression plus élevée (27.75 MPa à 28 jours) par rapport aux autres mortiers à base de fillers calcaires et de poudre de brique.

**Tableau IV.6 :** Les résistances des mortiers immergé dans HCl.

mortier Age	5% FC	10% FC	15% FC	5% PB	10% PB	15% PB	0%
2j	13,62	15,06	13,49	18,81	16,87	8,01	11,57
28j	20,62	27,75	25,18	25,65	25,13	25,25	24,7



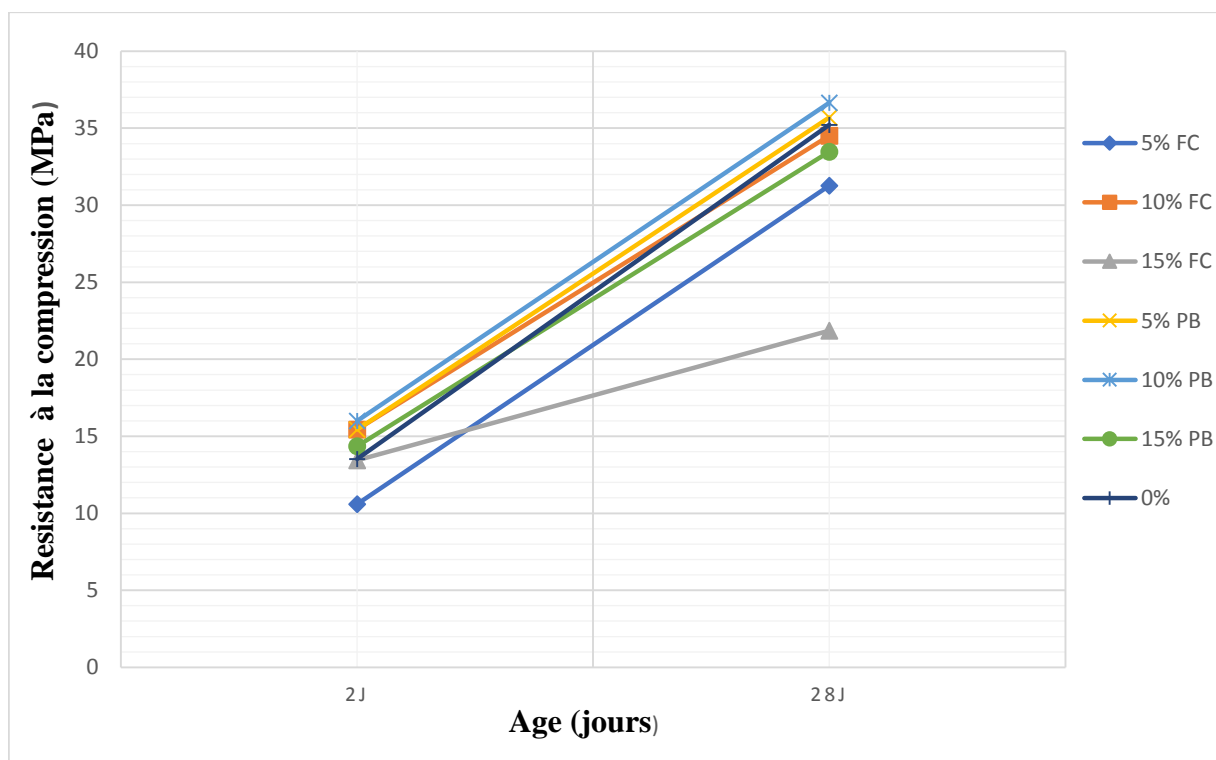
**Figure IV.6 :** Comparaison des résistances mécaniques à la compression des différents mortiers immergés dans HCl.

- **Etude comparative entre les mortiers dans la solution Ca(OH)<sub>2</sub>**

La figure IV.7 et le tableau IV.7 montrent que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec l'ajout de poudre de Brique par rapport aux mortiers avec les fillers calcaires et ceci pour les deux périodes 2 jours et 28 jours.

**Tableau IV.7 :** Les résistances des mortiers immergés dans Ca(OH)<sub>2</sub>.

mortier \ Age	5% FC	10% FC	15% FC	5% PB	10% PB	15% PB	0%
2j	10,6	15,43	13,43	15,43	16	14,36	13,53
28j	31,26	34,5	21,85	35,7	36,65	33,47	35,22



**Figure IV.7 :** Comparaison des résistances mécaniques à la compression des différents Mortiers immergées dans  $\text{Ca(OH)}_2$ .

#### IV.7. Conclusion

- Une substitution d'une partie du ciment par 10% de fillers calcaires produirait une protection moyenne contre l'attaque acide.
- En général les mortiers à base d'additions minérales présentent les meilleures résistances aux milieux agressifs par rapport aux mortiers sans ajouts.
- La perte en poids des mortiers à base de fillers calcaires immergés dans HCl est supérieure à celle des mortiers à base de poudre de briques.
- Les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec l'ajout de la poudre de Brique par rapport aux mortiers avec fillers calcaires.
- Nous constatons que le mortier témoin 0% subi moins de dégradation en solution acide par rapport aux autres mortiers, par contre en solution basique il se trouve que le mortier témoin est le plus dégradé ; Toutefois c'est l'inverse qui se produit concernant la poudre de brique.
- l'examen des résultats montre que l'effet de l'acide sur la résistance à la compression est plus significatif que celui de la base.

# Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de l'utilisation de divers ajouts minéraux (fillers calcaires et poudre de brique) sur la durabilité des mortiers vis-à-vis des milieux agressifs. Les principaux résultats que nous pouvons tirer de cette étude sont:

- Concernant le ciment, les résultats des essais (surface spécifique Blaine, masses volumiques apparentes et absolues, consistance et temps de début et fin de prise) ont été trouvés dans les intervalles conformément aux normes en vigueur utilisés.
- Pour les granulats, les résultats des essais obtenus (masses volumiques apparentes et absolues, absorption d'eau, analyse granulométrique, équivalent du sable, foisonnement du sable) sont trouvés dans les intervalles conformément aux normes en vigueur utilisés.
- Nous pouvons améliorer la résistance à l'attaque par HCl par substitution partielle des additions minérales.
- La poudre de brique améliore la résistance à l'attaque acide d'une manière considérable par rapport aux fillers calcaires.
- Une substitution d'une partie du ciment par 10% de fillers calcaires produirait une protection moyenne contre l'attaque acide.
- Les mortiers à base des additions minérales présentent les meilleures résistances aux milieux agressifs par rapport aux mortiers sans ajouts.
- La perte en poids des mortiers à base de fillers calcaires immergés dans HCl est supérieure à celle des mortiers à base de poudre de briques.
- Les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec l'ajout de poudre de brique par rapport aux mortiers avec les fillers calcaires.

## Perspectives :

- Au lieu des mortiers on peut étudier la résistance des bétons aux attaques acides.
- Etude des mortiers à base d'ajouts comme (poudre de brique + fillers calcaires) aux attaques chimiques.
- Comportement des bétons aux milieux agressifs (HCl + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5% de concentration).



## Références Bibliographiques

- [1]: **DARBOIS. B, ROTHLAUF.W**, «CIMNT», Encyclopédie universalise.
- [2]: **GHOMARI. F** ; « science des matériaux de construction : ciment », département génie civil, université abou baker belkaid faculté des sciences de l'ingénieur-tlemcen, 2005 – 2006.
- [3]: **DUPAIN. R, LANCHON. J, SAIN-ARROMAN** ; Granulats, sols, ciment et béton ; deuxième Edition, casteilla éd. ISBN19952713514711.
- [4]: **GC 1712**, « Durabilité et réparation du béton », département génie civil, université de Sherbrooke – Canada, avril 2009.
- [5]: **A. C. D. E**; Production et perspective, Rapport de gestion, Exercice 2009, Mai 2010,112 p.
- [6]: **George Dreux** .nouveau guide du Béton throixieme édition .Edition Eyrolles.paris.1981
- [7]: Documentation de la Hamma bouziane le ciment portland
- [8]: Le centre d'information sur l'eau paris France ; [http:// www.cieau.com/toutpubL/teste14 / contenu 1423 .htm](http://www.cieau.com/toutpubL/teste14/contentu1423.htm) ,2009
- [9]: **Erik BNelson, jean –Francaois BARETAND, Michel MICHAUX** ; (1990) «ciment Additivies and Mechanisms Action»
- [10]: Le ciment est un matériau essentiel en construction. les parpaings de ciment ou blocs de béton servent à monter les murs .c catherine Roy ,CC By-Nc-ND 2 ,0 , Flickr
- [11]: **BENHADDA. M. A** ; « La durabilité du mortier à base de ciment de, Béni-Saf vis-à-vis de milieux basiques NaOH et NH<sub>4</sub>OH », Diplôme d'ingénieur d'état en chimie industrielle, Génie des procédés, Université Abou-Baker Belkaïd, 2011/2012,P.2-13.
- [12]: **RIO TINTO ALCAN** ; «Navire d'déchargeant de l'aluminium ». Colombie-Britannique, [www.riotintoalcan.com](http://www.riotintoalcan.com) . Date de consultation (02/2013).
- [13]: **PICASSO. P** ; Dossiers rallye, N°5, France, 11 novembre 2004.
- [14]: **GEORGES. D, JEAN. F** ; nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris ,Edition Eyrolles ,2009.

- [15]: **PRODUCT. R**; mars 1996 , cembureau, international ciment reviw , juillet 1997
- [16]: **CHICHAOUI. R**; Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister-USTMB d'oran -2008)
- [17]: Société suisse des ingénieurs et Architect, Norme SIA 215 ,«liant minéraux », Zurich 1978.
- [18]: L'emploi d'ajouts cimentaire dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglçage «ciment ASSOCIATION of CANADA» par Norman F.Macleod, ing .Mars 2005.
- [19]: **MILIER E.W**, «Blended ciments Applications and implication» ciment and concrete composites, vol. 15, No .4/PP.237-245,1993.
- [20]: **M. VENUAT** –la pratique des ciments , mortiers et bétons –Tome 1 :«caractéristiques des liants et des bétons , mise en œuvre des coulis et mortiers» - édition 2 –collection Moniteur .- 277 p-1989.
- [21]: **BYFORS. K** ,«Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and PH values in ciment paste» , Cem .concr,Res,1987,17,1,115-130.
- [22]: **MIDGLEYH.G, ANDILISTONJ. M**, «Thepenetrationofchloridesintohardened-cément pastes ,Cem,concr,Res»,1984.14,4,546-558.
- [23]: **MEUKAM. P**. «caractérisation des matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments», Thèse de doctorat, Université de Gergy-pontoise,2004.
- [24]: **C. AVENIR, B. ROSIER, D. SOMMAIN** ; ciment naturel; Grenoble, Glénat éd.ISBN 10 :2723 46 1580 ,176 P ;2007.
- [25]: **B.BOUNABE AYACHE** ; Automatisation du stackeur et le moteur four ;Rapport de stage à ERCE et SCHB ; Université de paul cézanne Aix Marseille 3 ;[http://www .bhautomation.fr / Download /Automatisation-stackeur – four – imenterie –DG .Pdf](http://www.bhautomation.fr/Download/Automatisation-stackeur-four-imenterie-DG.Pdf),2006-2007 .
- [26]: ASSOCIATION FRANCAISE de la connaissance et de l'application des Normes, Actualité technologique et scientifique, les ciments, disponible sur site web [http://www.techno-science .net/](http://www.techno-science.net/)(consulté le 12/04/2006) .
- [27]: **V. S. RAMACHADRAN**; concrete science ;concrete admixture Handbook; Second Edition; Noyes publication ;PP .12-13;1995.
- [28]: **D. SEDAN** ;Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces de fibre chanvre/ciment « Influence sur les propriétés mécaniques du composite » ; Thèse de doctorat, Université de limoges ;2007.

[29]: **PHOUMMAVONG**; matériaux de construction ;cours en ligne ; Université Nationale du Laos ;[http /www .la .refer.org /matériaux /défaut.html](http://www.la.refer.org/matériaux/défaut.html),2009.)

[30]: **ADAM M . NEVILLE** : « propriétés des bétons » ,traduit par le CRIB ,Edition Eyrolles, paris , 2000.

[31]: Fiche de propriété de la société LAFARGE pour les produits cimentaire

[32]: **IZEMMOUREN .O** ; «Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée» ; Diplôme de doctorat en sciences en génie civil option , matériaux de construction ,Université Mohamed Khider – Biskra 11/12 /2016,P.34

[33]: **KLAUS. J**; Aulis K.; Kai S.; Nordenswan E., The Effects of Cement Variations on Concrete Workability , Nordic Concrete Research, publication n° 26 -3.

[34]: **ZEROUB. h** ; « valorisation du verre l'élaboration de béton durable (approche expérimentale ) »mémoire de magister (spécialité SCIENCES ET GENIE MATERIAUX) option physico chimie des matériaux minéraux Boumerdes 15/02/2012.

[35]: **SOPHIE .H** ; « étude physique chimique et mécanique des interactions ciment-filler. Application aux mortiers ».thèse de l'institut national polytechnique de grenoble et de l'école nationale supérieure des mines de Saint –Etienne(spécialité : Génie des procédés).

[36]: **HARBI. R** ; 2009. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchets de briques. Mémoire de Magister, Université 08Mai 45, Guelma, Algérie.

[37]: **BOURMATTE. N** ; Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2004.

[38]: **HEIKEL M, ZOHDY. KM, ABDELKREEM. M**; Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks, Construction and Building Materials Vol. 38, P. 101–109, 2013.

[39]: **ABIB. Z, ABIB. H G, KHARCHI. F**, Effect of Clay Fines on the Behavior of Self-Compacting Concrete, Engineering « scientific research », Vol. 5, P. 213-218, 2013.

[40]: **BOUALI Khaled** ; « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires », mémoire de magister (spécialité: Génie des Matériaux) Option Physique et Mécanique des Matériaux UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2013/2014.

[41]: **BOMBLED J-P**, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment.



[42]: **WILLIAM. D, CALLISTER. JR** « Science et génie des matériaux » modulo Editeur, 2001.

[43]: **DUPAIN. R, LANCHON. R, SAINT-ARROMAN. J-C** ; «Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004.

[44]: **BELLEM. M** ; « Valorisation des déchets plastiques pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers » mémoire de master, université de M'sila, juin 2013.

[45]: **SYLVER. P** «science des matériaux», université pierre et marie curie 2005 ,2006

[46]: **BERRAIH. M** ; « Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en Génie Civil, option géomatériaux (ENSET Oran 2009/2010).

[47]: PDF réalisé par Zile-Marie Durosier Richard Bonneville.

[48]: **GEORGES DREUX**, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009.

[49]: **Anissa BESSA-BADREDDINE** ; « étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers » .THESE présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université de Cergy – pontoise (spécialité de Génie Civil) soutenue le 25 juin 2004.

[50]: **GUILLOIN. E** ; « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles», Thèse de doctorat, d'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 2004.

[51]: **ADENOT. F, BUIL. M** ; «Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water», Cement and Concrete Research 22, 259-272, 1992.

[52]: **KAMALI, S** ; « Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003.

[53]: **CARDE. C, FRANÇOIS. R**; «Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials», Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.

[54]: **ROZIERE. E** ; « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes, 2007.

[55]: **GUEMMADI. Z, ESCADEILLAS. G, TOUMI. B, HOUARI. H. ET CLASTRES. P** ; « Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciments », 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton CITEDUB 1, USTHB Alger, mai 2004

[56]: **KAMALI. S, GERARD. B, MORANVILLE. M**; «Modelling the leaching kinetics of cement-based materials influence of materials and environment», Cement and Concrete Composites 25, 451-458,2003.

[57]: **BADOZ. C, FRANCISCO. P, ROUGEAU. P**; «A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks», Proceedings of the Second International Congress of FIB, June 5 -8,2006.